

新型摆线针轮传动系统 动力学特性的研究

Study on the Dynamic Characteristics of New
Cycloid-Pin Wheel Drive System

单丽君 何卫东 著



科学出版社

新型摆线针轮传动系统 动力学特性的研究

单丽君 何卫东 著

贵州师范学院内部使用

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以实例分析的方法,从理论与实验两方面详细地介绍针摆行星传动的动力学分析方法。本书内容包括环板式针摆行星传动模态分析、环板式针摆行星传动系统幅频特性分析、环板式针摆行星传动非线性动态特性分析、RV 针摆行星传动系统的传动特性及功率流分析、RV 减速器非线性键合图模型的建立、基于键合图法 RV 减速器动力学特性分析、参数变化对 RV 减速器动力学特性的影响、基于数值方程 RV 减速器非线性动力学建模、非线性动力学方程求解、RV 减速器的幅频特性分析、RV 减速器非线性动态特性分析、环板式针摆行星传动系统动力学实验。

本书可以为从事行星齿轮传动系统动态特性研究工作的专业人员提供可借鉴的实践经验和方法,也可以作为机械工程专业研究生的学习参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

新型摆线针轮传动系统动力学特性的研究 / 单丽君, 何卫东著. —北京: 科学出版社, 2019.11

ISBN 978-7-03-062598-4

I. ①新… II. ①单… ②何… III. ①摆线针齿传动-系统动力学-研究 IV. ①TH132.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 225348 号

责任编辑: 杨慎欣 张培静 / 责任校对: 彭珍珠

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 11 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2020 年 1 月第二次印刷 印张: 13 3/4

字数: 277 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

针摆行星传动系统是在传统的摆线传动和渐开线行星传动系统的基础上发展演变而来的新型传动形式，按传动结构不同分为环板式针摆行星传动、RV 针摆行星传动、FA 针摆行星传动等。与普通定轴齿轮传动相比，针摆行星传动具有传动比范围大、多齿啮合承载能力大、传动效率高、刚度大、抗冲击能力强、体积小、结构紧凑等一系列优点，被广泛应用于工业机器人、风电、船舶、采矿等国民经济很多领域。

针摆行星传动系统结构复杂，存在内外多种啮合形式，自由度较多，导致针摆行星传动系统存在复杂的内部、外部激励和多种非线性因素，进而引起系统动力学行为复杂化。系统运动过程中，需要不同齿形、多对齿轮的有序啮合、协调工作，任何一个零件损坏都会影响系统工作效率，即使没有零件失效，齿轮系统在外部、内部激励的作用下也会产生振动和噪声。外部激励是指齿轮系统的其他外部因素对齿轮啮合和齿轮系统产生的动态激励，主要指原动机、负载的转速转矩波动、轴承的刚度和阻尼的变化、零件质量不平衡产生的惯性力和离心力等因素对齿轮系统啮合状态产生的影响，进而影响系统传动的平稳性和传动精度。内部激励是指时变啮合刚度、啮入啮出冲击、齿侧间隙、传动误差、轮齿受载变形等激励因素共同作用，引起齿轮啮合振动，同时其振动受系统中的传动轴、其他传动齿轮、轴承、箱体等多种振动的影响，因此具有强非线性特点及耦合效应。剧烈的振动还会产生噪声，进而引发其他的故障。这些振动不仅会恶化设备的动态性能，降低设备原有的精度、生产效率和使用寿命，而且由振动所产生的噪声会带来环境污染。因而针摆行星传动系统动力学问题受到企业、高校科研人员的广泛关注，其动力学特性一直是学术界研究的热点和难点。特别是采用针摆行星传动系统的产品正朝着高速、重载、轻型、高精度和自动化方向发展，高精密产品对该传动系统的动态性能方面的要求更加严格，其在传动过程中产生的振动和噪声等动力学行为已成为工程领域迫切需要研究和解决的问题。齿轮系统动态特性的研究有助于深入了解系统的结构形式、主要激励、几何参数、加工精度对传动性能的影响，从而指导高质量、高精度针摆行星传动系统的设计和制造。因此，研究针摆行星传动的系统振动、冲击和噪声等动态性能具有重要意义。

摆线针轮行星传动系统动力学研究的目的是研究系统的固有特性、动态响应、动力稳定性及系统参数对齿轮系统动态特性的影响，确定和评价齿轮系统的动态特性，给齿轮系统的设计提供理论依据。本书以环板式针摆行星传动和 RV 针摆

行星传动两种新型的传动形式为例,研究两者的固有频率、幅频振动特性、非线性动态响应、系统参数对系统动态响应的影响、振动与噪声实验测试。这两种传动形式相较于其他针摆行星传动具有明显的优势。环板式针摆行星传动是在分析比较以渐开线为齿形的环板式减速器和传统摆线针轮行星减速器各自优缺点的基础上研制出的一种新型摆线针轮行星传动。其特点是既保留了原摆线针轮行星传动的传动比范围大、硬齿面多齿啮合承载能力大、传动效率高、传动平稳等一系列优点,又因将转臂轴承由行星轮内移至行星轮外,尺寸不受限制,且省去了传统摆线针轮行星传动复杂的输出机构,具有较大的输出轴刚度,进一步提高传递转矩。而RV针摆行星传动具有传动比范围大、传动精度高、回差小、刚度大、抗冲击能力强、体积小、结构紧凑、传动效率高等特点。与谐波传动相比,RV针摆行星传动具有更高的疲劳强度、刚度和寿命,且回差精度稳定,不像谐波传动那样随着使用时间增加运动精度就会显著降低,故目前世界上许多国家高精度设备的传动多采用RV针摆行星传动。RV针摆行星传动在工业机器人领域的应用最为广泛,已成为工业机器人的三大核心技术之一。

本书具有以下特点:

(1) 在实例分析的基础上详细地阐述采用有限元法、数值仿真计算、键合图法等不同的方法进行针摆行星传动动力学分析的具体实施步骤,对读者具有实战性的指导。

(2) 详细地介绍针摆行星传动系统的典型的传动原理、结构形式、性能特点、动力学特性及分析方法,是针摆行星传动动力学研究的总结与凝练,为创造新型针摆传动形式提供研究基础。

(3) 包含动力学分析的完整、详尽的全过程,即固有频率与振型的计算与分析、动力学模型的建立、运动微分方程的推导、运动微分方程的求解、振动响应的分析、系统参数对动态响应的影响及振动与噪声的实验测试。既有分析方法的分析与对比,又有分析过程中细节和难点的具体处理方法,为其他针摆行星传动动力学分析提供可借鉴的实践经验和方法。

本书在写作过程中得到了大连交通大学董华军教授、阎长罡教授、雷蕾副教授、施晓春副教授的热情支持和帮助,在此表示衷心感谢。本书能够出版得益于大连交通大学机械工程学院的大力支持和学院学科建设经费的资助,在此向大连交通大学机械工程学院的领导表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者
2019年5月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状综述	1
1.2.1 针摆行星传动	2
1.2.2 环板式针摆行星传动	5
1.2.3 RV 针摆行星传动	7
1.2.4 FA 针摆行星传动	9
1.2.5 齿轮动力学的研究现状	11
1.3 本书的主要内容	15
参考文献	17
第 2 章 环板式针摆行星传动模态分析	24
2.1 引言	24
2.2 有限元模态分析原理	24
2.3 四环板针摆行星传动典型零件的有限元模态分析	27
2.4 输入轴系的模态分析	31
2.4.1 用有限元法对输入轴系进行模态分析	31
2.4.2 用传递矩阵法计算输入轴系的固有频率	32
2.5 双电机驱动四环板针摆行星减速器模态实验	36
2.5.1 环板模态测试	37
2.5.2 箱体模态测试	37
2.5.3 输入轴模态测试	39
2.5.4 模态实验结果分析	40
2.6 本章小结	40
参考文献	40
第 3 章 环板式针摆行星传动系统幅频特性分析	41
3.1 引言	41

3.2	环板式针摆行星传动非线性动力学模型	41
3.2.1	系统建模的假设条件	41
3.2.2	系统动力学模型建立	41
3.2.3	系统的运动微分方程	43
3.2.4	转化方程	45
3.2.5	方程无量纲化处理	50
3.3	系统微分方程的求解	51
3.3.1	参量说明	51
3.3.2	代数平衡方程	53
3.4	系统的频域特性分析	55
3.4.1	系统的幅频曲线	56
3.4.2	参数对系统动态特性的影响	57
3.5	本章小结	60
	参考文献	60
第4章	环板式针摆行星传动非线性动态特性分析	61
4.1	引言	61
4.2	分析非线性系统的方法	61
4.2.1	时间历程	61
4.2.2	相平面图	61
4.2.3	Poincaré 映射截面	62
4.2.4	频谱分析	63
4.3	系统非线性微分方程的求解	63
4.3.1	求解方法	63
4.3.2	积分初值的选取	65
4.3.3	方程组的降阶处理	67
4.4	系统的稳态响应分析	72
4.5	齿侧间隙对系统非线性动态特性的影响	77
4.6	本章小结	82
	参考文献	82
第5章	RV 针摆行星传动系统的传动特性及功率流分析	84
5.1	引言	84
5.2	RV 减速器的结构及传动原理	84

5.3 RV 减速器的传动特点及传动比	86
5.3.1 RV 减速器的传动特点	86
5.3.2 RV 减速器的传动比及理论转速计算	87
5.4 RV 减速器的功率流分析	88
5.4.1 系统各构件角速度及力矩分析	89
5.4.2 功率流分析	90
5.5 RV 减速器传动效率计算	91
5.6 本章小结	92
参考文献	93
第 6 章 RV 减速器非线性键合图模型的建立	94
6.1 引言	94
6.2 键合图的理论概述	94
6.2.1 键合图基本原理	95
6.2.2 基本键合图元	96
6.2.3 键合图增广	99
6.2.4 机械系统的键合图建模过程	102
6.2.5 由键合图模型列写系统状态方程	104
6.3 开关键合图的建模方法	105
6.4 RV 减速器非线性因素及其键合图模型的建立	107
6.4.1 齿侧间隙	108
6.4.2 时变啮合刚度	108
6.4.3 综合啮合误差	109
6.4.4 含间隙及时变啮合刚度键合图模型的建立	110
6.5 RV 减速器非线性键合图模型的建立	111
6.6 本章小结	112
参考文献	113
第 7 章 基于键合图法 RV 减速器动力学特性分析	115
7.1 引言	115
7.2 MATLAB/Simulink 软件简介	115
7.2.1 Simulink 多功能子模块库	115
7.2.2 Simulink 建模与仿真的特点	117
7.3 RV 减速器系统状态方程的建立	117
7.4 Simulink 模型的建立	120

7.5	模型中参数的确定	122
7.5.1	系统主要构件的转动惯量	123
7.5.2	系统主要构件的扭转刚度	124
7.5.3	渐开线齿轮时变啮合刚度及啮合阻尼计算	125
7.5.4	负载转矩的确定	126
7.6	仿真结果分析	126
7.6.1	系统的仿真结果分析	126
7.6.2	角速度的仿真结果分析	128
7.6.3	角加速度的仿真结果分析	130
7.7	本章小结	131
	参考文献	132
第 8 章	参数变化对 RV 减速器动力学特性的影响	133
8.1	引言	133
8.2	齿侧间隙的影响	133
8.3	阻尼的影响	137
8.4	负载的影响	140
8.5	本章小结	142
	参考文献	142
第 9 章	基于数值方程 RV 减速器非线性动力学建模	143
9.1	引言	143
9.2	RV 减速器非线性动力学模型	143
9.2.1	系统建模的假设条件	143
9.2.2	非线性动力学模型	144
9.2.3	系统的运动微分方程	144
9.3	方程坐标变换	147
9.4	方程无量纲化处理	153
9.5	本章小结	154
	参考文献	155
第 10 章	非线性动力学方程求解	156
10.1	引言	156
10.2	啮合刚度的计算	156
10.2.1	轴承刚度的计算	156

10.2.2	渐开线齿轮刚度的计算	157
10.2.3	摆线针轮啮合刚度的计算	158
10.3	多自由度解析谐波平衡法	160
10.3.1	激励形式	161
10.3.2	响应形式与非线性函数形式	162
10.3.3	刚度矩阵	163
10.3.4	代数平衡方程	163
10.3.5	拟牛顿法	164
10.3.6	方程的雅可比矩阵	165
10.4	本章小结	166
	参考文献	166
第 11 章	RV 减速器的幅频特性分析	167
11.1	引言	167
11.2	系统的固有频率	167
11.3	线性系统的幅频特性	169
11.4	非线性系统的幅频特性	172
11.5	参数对系统幅频特性的影响	175
11.5.1	啮合刚度对系统幅频特性的影响	175
11.5.2	综合啮合误差对系统幅频特性的影响	176
11.5.3	阻尼对系统幅频特性的影响	177
11.6	本章小结	178
	参考文献	178
第 12 章	RV 减速器非线性动态特性分析	179
12.1	引言	179
12.2	非线性动力学方程的求解方法	179
12.2.1	微分方程的降阶处理	179
12.2.2	积分初值的选择	183
12.2.3	龙格-库塔算法	184
12.3	系统的稳态响应	185
12.4	阻尼对系统非线性动态特性的影响	188
12.5	本章小结	191
	参考文献	191

第 13 章 环板式针摆行星传动系统动力学实验	192
13.1 引言	192
13.2 振动实验测试	192
13.2.1 实验设备及测点布置	192
13.2.2 实验测试工况及情况说明	193
13.2.3 结果分析	200
13.3 噪声测试	202
13.3.1 噪声与载荷的关系	202
13.3.2 噪声与转速的关系	207
13.4 本章小结	210
参考文献	210

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

针摆行星传动系统是行星传动的一种，是由摆线齿轮传动和渐开线齿轮传动组成的新型传动系统，这种传动系统具有传动比范围大、多齿啮合承载能力大、传动效率高、刚度大、抗冲击能力强、体积小、结构紧凑等一系列优点。但其结构复杂，存在内、外多种啮合形式，自由度较多，这就导致了系统存在复杂的内部、外部激励和多种非线性因素，进而引起系统动力学行为复杂化。针摆行星传动系统的振动与其他振动系统相比具有特殊性，虽然任何机械结构在外界激励下都可能产生振动，但除一般的振动形式外，系统还可能存在其他几种振动形式：啮合力、啮入啮出冲击、传递间隙、误差、变形引起的振动。这些振动，不仅恶化了设备的动态性能，降低了设备原有的精度、生产效率和使用寿命，而且由振动所产生的噪声会带来环境污染，因而针摆行星传动系统动力学问题一直受到人们的广泛关注，其动力学特性一直是学术界研究的热点和难点。特别是高精密产品对该传动系统的动态性能方面的要求更加严格，其在传动过程中产生的振动和噪声等动力学行为已成为工程领域迫切需要研究和解决的问题。系统动态特性的研究有助于人们了解齿轮系统的结构形式、几何参数及加工方法等对动态性能的影响，从而指导高质量齿轮系统的设计和制造。因此，研究针摆行星传动系统振动、冲击和噪声等动态性能具有重要的理论和实用价值。

1.2 国内外研究现状综述

摆线针轮传动是一种以外摆线为齿廓曲线的少齿差传动，分为一齿差和二齿差针摆行星传动，由于针摆传动理论上是摆线轮一半的齿参与啮合，啮合齿数多，因此具有传动比范围大、可靠性高、承载能力大、寿命高等特点。新型针摆行星传动系统是在传统的针摆行星传动的基础上，由渐开线齿轮传动和摆线齿轮传动组合而成的新的传动系统，主要传动形式有环板式针摆行星传动、RV 针摆行星传动和 FA 针摆行星传动等。

1.2.1 针摆行星传动

摆线齿廓应用于传动的历史, 早于渐开线齿廓, 主要用于轻载和测量分度领域, 在早期的钟表中已出现了摆线齿廓传动。20 世纪 20 年代, 德国人罗兰兹·普拉首次证明了采用圆弧和摆线齿廓作为共轭曲线进行传动时, 完全满足齿廓啮合基本定理规定的定传动比条件, 并根据啮合原理提出了以外摆线为齿廓曲线的少齿差传动。50 年代, 日本住友重机械工业株式会社购买了此项专利并进行了改进, 直到解决了摆线修形难题后针摆行星才在全世界范围内得到广泛的推广和应用。针摆行星传动的原理如图 1.1 所示, 其零件组成如图 1.2 所示。

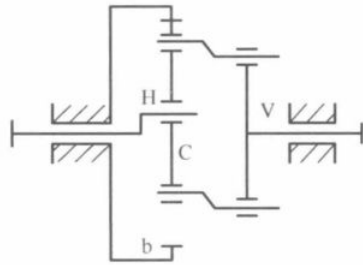


图 1.1 针摆行星传动原理简图

H-曲柄轴; C-摆线轮; b-针轮; V-输出机构

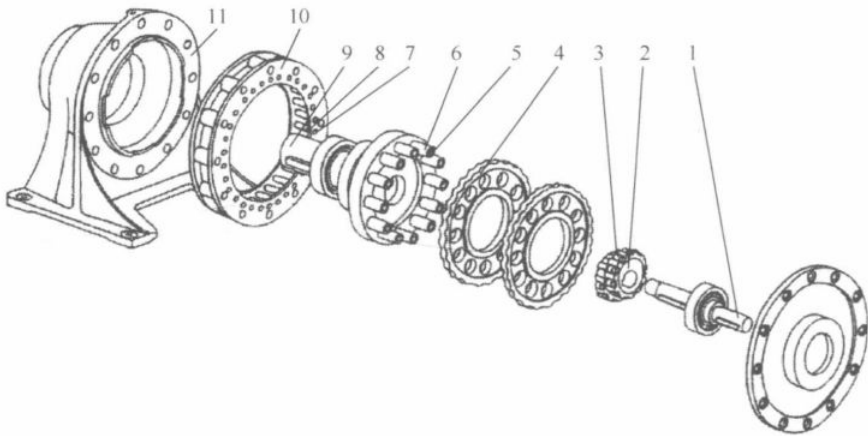


图 1.2 针摆行星传动零件拆分图

1-输入轴; 2-双偏心套; 3-转臂轴承; 4-摆线轮; 5-柱销; 6-柱销套;
7-针齿销; 8-针齿套; 9-输出轴; 10-针齿壳; 11-底座

公司、辽宁科技大学、上海交通大学等科研机构 and 院校。

国内一些专家、学者在摆线传动理论方面进行了深入研究,取得了一些成果。如李力行教授提出了能概括各种齿形修形的通用的摆线轮齿形方程式和一种修形后工作部分符合共轭条件的摆线轮优化新齿形^[2-7];高兴岐教授提出了摆线针轮行星传动胶合失效的计算准则^[8];周建军研制了密珠摆线传动的物理样机^[9-10];关天民教授在回差、公法线长度和修形等方面进行了大量的分析研究,提出了摆线传动受力分析计算方法和反弓齿廓的概念^[11-19];王淑妍等建立了内啮合变截面摆线轮齿廓曲面曲率的统一表达式和平行轴内啮合行星传动的齿廓啮合方程^[20-21]。

根据结构的不同,针摆行星传动分为一齿差针摆行星传动、二齿差针摆行星传动和小型针摆行星传动。

1. 一齿差针摆行星传动

一齿差针摆行星传动理论上同时参与啮合的轮齿对数为针轮齿数的一半。但在载荷的作用下,实际同时接触齿数少、齿面作用力和相对滑动速度大,导致针齿弯断、齿面胶合等破坏形式。为了解决齿面胶合问题,日本首先采用二齿差齿形增加摆线轮与针齿的同时啮合齿数和承载能力,避免了早期破坏和齿面胶合。

2. 二齿差针摆行星传动

其传动特点是同时啮合齿数多,承载能力大,滑动速度及瞬时摩擦功小,传动效率高,传动平稳、噪声小。对于低速比范围的摆线减速器,辽阳制药机械厂于1978年首先研制成功两台二齿差摆线针轮减速器,魏祥稚高工在我国率先对二齿差摆线针轮传动进行了成功的实践探索。郑州工学院冯澄宙教授也对二齿差摆线针轮传动原理、强度计算、短幅外摆线齿轮的公法线测量方法进行了研究。大连交通大学马英驹教授对二齿差摆线轮齿廓顶部曲线参数与复合齿形进行了优化计算^[22]。

3. 小型针摆行星传动

小型针摆行星传动具有结构紧凑、体积小、质量轻、承载能力大和同轴性好等许多优点,可以广泛地应用于航空、航天、兵器、石油、化工、纺织、轻工食品、精密机械、医疗器械、仪器仪表、机器人和工业机械手以及高级电动玩具等各个领域。其传动结构如图1.4所示。关天民教授对超小型摆线针轮行星传动和受力分析进行研究,提出了较准确的受力分析计算方法,开发出超小型摆线传动减速器的设计绘图软件^[23-24]。

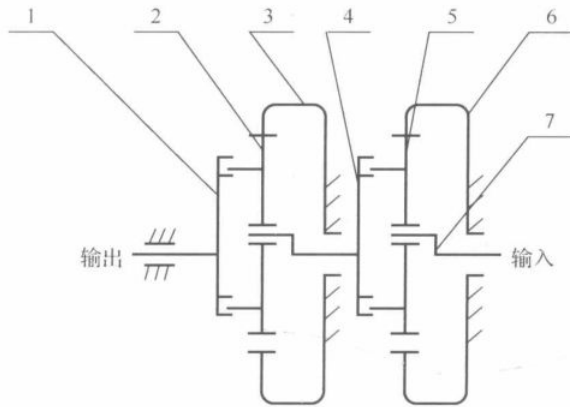


图 1.4 小型针摆行星传动结构

1-输出法兰；2-摆线轮；3-针齿轮 1；4-输出法兰；5-摆线轮；
6-针齿轮 2；7-曲轴与转臂轴承

1.2.2 环板式针摆行星传动

虽然针摆行星传动具有一系列优点，但仍存在以下问题：①转臂轴承处在高速重载下工作，轴承寿命较短；②输出机构中的销轴是悬臂式结构，受力不均匀，影响运动精度，且易产生折断破坏。

1956年，我国著名机械学专家朱景梓教授根据双曲柄机构的原理提出了一种新型渐开线少齿差传动机构，其特点是当输入轴旋转时，行星轮不是作摆线运动，而是通过一双曲柄机构引导作圆周平动。1985年，冶金工业部重庆钢铁设计研究院陈宗源高工提出了平行轴式少齿差内齿行星齿轮传动装置，即三环减速器。1992年，重庆钢铁（集团）有限责任公司研制出了单齿环双曲柄输入少齿差减速器。这种以渐开线为齿形的单、双、三环板式减速器，传动比较大，比通用的渐开线少齿差减速器省去了输出机构，输出轴刚性好，转臂轴承由行星轮内移到行星轮外，但由于渐开线齿形原因，仍然保留着通用渐开线少齿差减速器的一些缺点。

环板式针摆行星传动是一种新型的传动形式，它是在分析比较以渐开线为齿形的环板式减速器和传统针摆行星减速器各自优缺点的基础上研制出的一种新型针摆行星传动。其特点是既保留了原针摆行星传动的传动比范围大、硬齿面多齿啮合承载能力大、传动效率高、传动平稳等一系列优点，又因将转臂轴承由行星轮内移至行星轮外，尺寸不受限制，且省去了传统针摆行星传动复杂的输出机构，具有较大的输出轴刚度，进一步提高传递转矩。因而它是一种很有研究开发价值

的新型传动,在运输、石油化工、矿山、建筑、轻工等行业具有广泛的应用前景。

该传动从产生至今,学者们进行了大量的研究工作,在受力分析、齿形优化、静态性能等方面的研究已达到一定的理论深度,但对其动态性能的研究刚刚开始,而动态特性恰恰是影响整机性能的主要因素。目前绝大多数齿轮动力学方面的研究主要以单对齿轮传动研究为主,而且多是渐开线齿轮传动,对行星齿轮传动系统动态特性的研究甚少,特别是对环板式针摆行星传动动态特性的研究更少。因此,本书对环板式针摆行星传动动力学特性的理论与实验研究具有一定的理论意义和实用价值。

鉴于传统的针摆行星减速器和渐开线环板减速器的局限性,为提高机械传动装置的承载能力、传动效率和可靠性等指标,大连交通大学何卫东教授于1999年创新研制出一种新型的环板式针摆行星传动,同时具有渐开线环板和传统针摆行星传动的优点^[25]。

双曲柄环板式针摆行星传动的结构形式主要有以下三种:同步带联动双曲柄四环板针摆行星传动(图1.5)、输入轴与输出轴同轴线的三齿轮联动双曲柄四环板针摆行星传动(图1.6)和双电机驱动双曲柄四环板针摆行星传动(图1.7)^[25-28]。

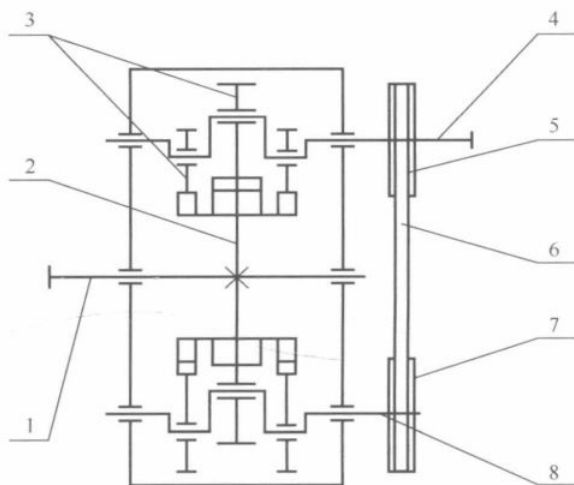


图 1.5 同步带联动双曲柄四环板针摆行星传动结构

- 1-输出轴; 2-摆线轮; 3-带针轮的环板; 4-输入轴; 5-主动同步带轮;
6-同步带; 7-从动同步带轮; 8-从动曲柄轴