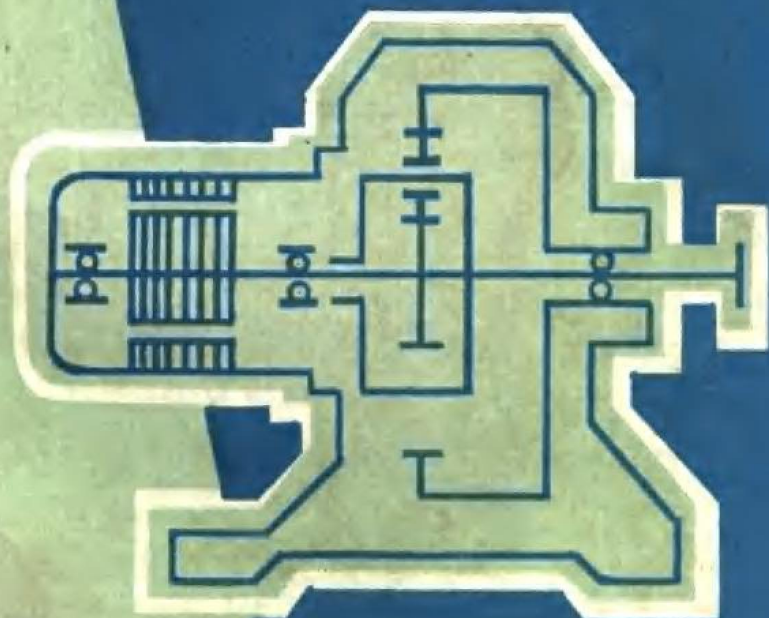


渐开线齿轮行星传动

● 原理 ● 设计计算 ● 测试 ●

杨廷栋 周寿华 肖忠实 编著
申 哲 刘伟基 余心德



成都科技大学出版社

内 容 提 要

这是一本论述有关渐开线齿轮行星传动的基本理论、设计计算方法和测试技术的科技参考书。全书共分为渐开线齿轮行星传动的运动学、动力学、几何学、主要零部件设计、选型与应用、基本测试方法等六大部分。

本书是在充分地分析比较了目前国内外有关著作，吸取了它们的特点，并总结了我国国家在这方面的工程实践、科研工作和我们的教学经验基础上编著而成的。因此，本书内容比较全面系统，注意了联系实际，突出主要问题和重点，并适当地反映了现代设计计算方法和科学研究的新成果。编写时注意了由浅入深，流畅易懂，概念完整准确，思路清晰，便于自学。

本书可作为机械学专业研究生教学用教材，其基本内容也适用于机械类本科学生作选修课教材，同时可供研究部门和厂矿企业从事于渐开线齿轮行星传动的设计、科研、制造、使用方面的工程技术人员参考。

渐开线齿轮行星传动

编者 杨廷栋 周寿华 肖忠实

申 哲 刘炜基 余心德

成都科技大学出版社出版

四川省新华书店发行

四川省三台县印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 19

1986年7月第1版 1986年7月第1次印刷

印数 1—4000 字数 474千字

统一书号：15475·6 定价：4.20元

前 言

当前机械制造业的主要任务是进一步提高机械产品的质量，提高机器的效率，减轻机器的重量和缩小外廓尺寸，合理地利用原材料。这就对机器中的传动装置提出了高的要求，而采用渐开线齿轮行星传动则是实现上述任务和要求的途径之一。

渐开线齿轮行星传动的广泛应用是在五十年代初期发展起来的。因为渐开线齿轮行星传动具有多分流传动、低应力啮合（内啮合）、（径向）作用力平衡、运动多变性等一系列特点，所以在同等工作条件下，与普通齿轮传动相比，渐开线齿轮行星传动具有外廓尺寸小、重量轻、效率高、工作可靠、同轴传动等许多突出的优点，因而发展迅速。目前已广泛应用于国防工业、机械制造、矿山冶金、石油化工、起重运输、工程机械、轻工纺织、仪器仪表、医疗器械、食品工业等各个部门。随着科学技术水平的提高，现今渐开线齿轮行星传动已达到了相当高的水平：齿轮圆周速度达 $150\sim 200$ (m/s)，传递功率达 100000 (PS)^[69]，效率达 0.98 以上，外廓尺寸和重量比同等工作条件下的普通齿轮传动减小 $1/2\sim 1/6$ 。渐开线齿轮行星传动不仅适用于高速大功率，而且在低速大扭矩设备上也已推广使用，它几乎适用于一切功率、速度范围和一切工作条件，可用作减速、增速、有级和无级变速、运动的合成和分解、以及其它特殊的应用，成为世界各国机械传动领域中发展的重点，对国民经济的发展有重要意义。

近十多年来，我国许多科研单位、工厂和高等院校的密切配合，也对渐开线齿轮行星传动开展了研制工作，并且取得了不少良好的经验和成果，这对发展渐开线齿轮行星传动都将起到重要的推动作用。在此基础上有必要作更全面深入的研究，但是，目前国内还缺乏这方面的专著，鉴于这种情况，为了适应渐开线齿轮行星传动的发展和应用，编写一本这方面的书籍是十分必要的。因此，我们于1979年到1983年间先后编写了《行星传动》讲义、机械专业用的《行星齿轮传动》选修课教材，以及机械学研究生用《渐开线齿轮行星传动》教材，先后在一机部培训班、机械类本科学生以及机械学研究生教学中试用，与此同时还举办了行星齿轮传动技术讲座，广泛地听取了各方面的意见，再结合近年来我们科研小组所进行的研究、设计成果和工作经验，并在比较全面地收集和研究了国内外有关资料的基础上，经过不断充实、整理、修改编著成这本书。

全书比较系统地全面地论述了渐开线齿轮行星传动的基本理论、设计计算方法和测试技术。本书在行星齿轮传动的分类，传动比计算方法，封闭功率的判断与计算，齿轮几何尺寸的计算，行星齿轮传动的变位特点和装配条件，行星齿轮传动轴承工作的特点、结构设计和轴承的计算，行星齿轮传动类型的选择与应用，行星齿轮传动的测试方法和现代机械设计方法等内容方面均具有一定特色。书中还列有供设计计算使用的资料和图表，以及设计计算实例。通过教学实践和工程设计证明，本书既可对从事于渐开线齿轮行星传动研究工作者提供一定的理论基础，而且对从事于实际工程设计者提供较系统、较完整的设计计算方法和数

据资料。并且各章附有实例，说明设计计算方法与图表、数据资料使用方法。

开展渐开线齿轮行星传动的研究工作，并大力推广和应用，对于我国国民经济的发展，以及在本世纪内把我国建设成为农业、工业、国防和科学技术现代化的伟大的社会主义强国，将具有重大的意义。

本书的第一、五章及六章一部份由杨廷栋同志编著；第二、三章及八章一部份由周寿华同志编著；第四章由肖忠实同志编著，第六章一部份及第七章和第八章一部份由申哲同志编著，第九章及十章一部份由刘炜基同志编著，第十章另一部份由余心德同志编著。全书由肖忠实、杨廷栋同志负责汇总和整理，宁开平教授主审，书中插图由王幼君同志绘制。由于我们的水平和经验所限，书中难免存在不少缺点和错误，深望读者给予批评、指正。

作者

于成都科技大学 一九八四年七月

目 录

第一章 渐开线齿轮行星传动概论	1
§ 1-1 渐开线齿轮行星传动的定义.....	1
§ 1-2 渐开线齿轮行星传动的特点.....	1
§ 1-3 渐开线齿轮行星传动的类型.....	3
一、按所采用的基本构件组成的不同和齿轮啮合配置方式来进行分类	
二、按行星齿轮传动的活动度来分类	
三、按中心轮与转臂之间或两个中心轮之间是否形成封闭运动链来分类	
§ 1-4 渐开线齿轮行星传动的发展概况.....	7
第二章 渐开线齿轮行星传动的运动学	10
§ 2-1 分析法.....	10
一、相对角速度法	
二、列表法	
§ 2-2 图解法.....	21
一、速度图解法	
二、矢量法	
第三章 渐开线齿轮行星传动中力和能量的关系	31
§ 3-1 行星齿轮传动中的作用力和力矩.....	31
一、齿轮副中的啮合作用力	
二、基本构件上的作用力矩	
三、行星轮支承上的作用力	
四、基本构件的轴和支承上的作用力	
§ 3-2 行星齿轮传动的效率.....	37
一、啮合功率法	
二、力矩法	
三、传动比法	
四、摩擦损失系数的确定	
§ 3-3 封闭功率.....	58
一、封闭功率的概念	
二、封闭差动行星齿轮传动的功率流和封闭功率	
第四章 渐开线圆柱齿轮行星传动的啮合计算	65
§ 4-1 几何参数与尺寸计算式.....	65
一、统一的变位系数定义	

二、齿顶圆与齿根圆尺寸的确定	
三、按插切计算时应注意插齿刀各参数的影响	
§ 4—2 “干涉”现象及其校核计算	82
一、渐开线干涉	
二、过渡曲线干涉	
三、其它干涉现象	
§ 4—3 行星齿轮传动各轮齿数的确定	94
一、确定各轮齿数的条件	
二、确定各轮齿数的一些方法	
§ 4—4 行星齿轮传动的变位计算	110
一、2K—H[A]型传动的变位计算	
二、3K型行星传动的变位计算	
三、公用行星齿轮的变位计算问题	
§ 4—5 轮齿啮合强度计算	118
一、渐开线圆柱齿轮传动的轮齿强度计算式	
二、渐开线圆柱齿轮行星传动轮齿强度计算的特点	
§ 4—6 渐开线少齿差行星传动啮合计算的特点	130
第五章 行星轮间的载荷分配与均载装置	135
§ 5—1 行星轮间载荷分配的不均匀性	135
§ 5—2 行星轮间的均载方法与均载装置	136
一、行星轮间的均载方法	
二、均载装置	
§ 5—3 均载方法和均载装置的选择	145
§ 5—4 行星轮间载荷分配不均匀系数的确定	148
一、对于2K—H型行星齿轮传动	
二、对3K型行星齿轮传动	
第六章 渐开线齿轮行星传动主要零部件设计	151
§ 6—1 内齿轮的结构与计算	151
一、内齿轮的结构	
二、内齿圈轮缘的计算	
§ 6—2 行星架的结构与计算	157
一、行星架的结构	
二、行星架的变形计算	
三、行星架的精度	
§ 6—3 轴承	167
一、滚动轴承的计算	
二、提高轴承寿命的措施	
§ 6—4 液力联轴器、变矩器和磁粉离合器	181
一、液力联轴器	

二、液力变矩器	
三、电磁粉末离合器	
第七章 行星变速器的润滑及热稳定性计算	196
§ 7—1 行星变速器的润滑	196
一、润滑方法	
二、润滑油的选择	
§ 7—2 热稳定性计算	201
第八章 行星传动的可靠性设计和电子计算技术的应用	202
§ 8—1 行星传动的可靠性设计	202
一、可靠性基本概念和一般关系式	
二、传动装置零件的可靠度计算	
三、行星传动装置的可靠性	
§ 8—2 电子计算机在行星齿轮传动设计中的应用	211
一、确定行星齿轮传动的齿数	
二、变位齿轮传动的几何尺寸计算	
三、行星齿轮传动的轮齿强度计算	
第九章 渐开线齿轮行星传动类型的选择与应用	221
§ 9—1 渐开线齿轮行星传动类型的选择	221
一、2K—H[A]、[B]、[C]、[D]型传动	
二、2K—H[E]型传动	
三、3K型传动	
四、K—H—V型传动	
§ 9—2 渐开线齿轮行星传动的应用	229
一、作为减速器	
二、作为增速器	
三、作为差速器	
四、作为变速器	
五、在无级变速器上的应用	
六、在其它方面的应用	
第十章 行星齿轮传动的试验及试验结果的统计分析	261
§ 10—1 概述	261
§ 10—2 开式试验	261
§ 10—3 封闭式试验	263
§ 10—4 行星轮间载荷分配不均匀系数的测定	264
一、K _p 值测定的原理和试验装置	
二、各因素对K _p 值的影响	
§ 10—5 疲劳寿命的分布	268
一、正态分布	
二、对数正态分布	

三、威布尔分布

四、指数分布

§ 10—6 疲劳寿命曲线..... 279

计算例题

渐开线齿轮行星传动的设计计算..... 284

第一章 渐开线齿轮行星传动概论

§ 1—1 渐开线齿轮行星传动的定义

渐开线齿轮传动是机械传动最主要的传动形式之一，在机械工程中获得了非常广泛的应用。为了提高机器设备、仪器和仪表等的工作可靠性和寿命，提高效率，节约能源，减小外廓尺寸和重量，降低原材料消耗，其主要的方法是将固定轴线的普通渐开线齿轮传动（或称定轴轮系）改为渐开线齿轮行星传动。

渐开线齿轮行星传动是一种具有动轴线的齿轮机构，它是由一系列互相啮合的渐开线齿轮所组成，并且在传动时至少有一个齿轮的几何轴线是绕另一个齿轮的固定几何轴线回轮的，这样的齿轮传动机构就称为渐开线齿轮行星传动（简称行星齿轮传动）或称周转轮系，如图1—1，a、b所示。

在行星齿轮传动中，几何轴线固定，并与主轴线 OO 重合，而且行星轮又绕着它滚转的齿轮称为中心轮，如图1—1中齿轮 a 、 b 。通常又将最小

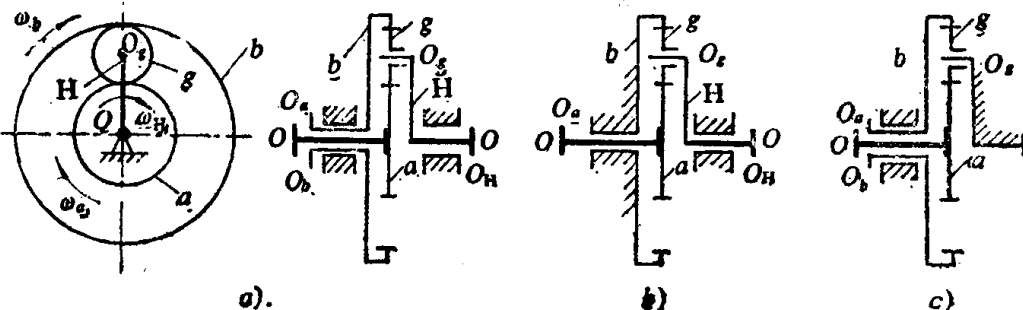


图1—1 具有三个基本构件的行星齿轮传动

中心轮 a 称为太阳轮，而将固定不动的中心轮 b 称为支持轮。图1—1，a、b中齿轮 g ，具有可运动的轴线 Og ，传动时齿轮 g 一方面绕自身的几何轴线 Og 回转，同时其轴线 Og 又随行星架 H 绕固定的几何轴线 OO 回转，它的运动与太阳系中行星的运动相似，既有自转又有公转，故称齿轮 g 为行星齿轮（简称行星轮）。支持行星轮自转及公转的构件称为行星架（又称转臂或系杆），用字母 H 表示。中心轮的回转轴线和行星架的回转轴线相互重合，并且相对于机壳的位置是固定不变的。这一共同轴线 OO 称为主轴线。凡是轴线与主轴线重合，并且传动时又直接承受外转矩作用的构件称为基本构件，图1—1中齿轮 a 、 b 和行星架 H 便是基本构件。

具有三个基本构件的行星齿轮传动，若基本构件之一，如行星架 H 固定，则行星齿轮传动就变成了固定轴线的普通齿轮传动（定轴轮系），如图1—1，c所示；若中心轮 b 固定，这时就成为自由度为1的行星齿轮传动（又称行星轮系），见图1—1，b；若所有三个基本构件均可转动，就成为自由度为2的差动传动或称差动轮系，如图1—1，a所示。工程界习惯上常将行星轮系和差动轮系的齿轮传动机构统称为行星齿轮传动。

§ 1—2 渐开线齿轮行星传动的特点

行星齿轮传动与普通齿轮传动相比，当它们的零件材料和机械性能、制造精度、工作条件等均相同时，前者具有一系列突出的优点，因此它常被用作减速器、增速器、差速器和换

向机构以及其它特殊用途。

行星齿轮传动的主要特点如下：

1.体积小、重量轻、结构紧凑，传递功率大、承载能力高。由于行星齿轮传动是一种共轴线式的传动装置，即具有同轴线传动的特点，在结构上采用了对称的分流传动结构，即用几个完全相同的行星轮均匀地分布在中心轮的周围来共同分担载荷，因而使每个齿轮所受的负荷较小，相应齿轮模数就可较小，并且合理地应用了内啮合，充分利用了内啮合承载能力高和内齿轮（或称内齿圈）的空间容积，从而缩小了径、轴向尺寸，使结构很紧凑，而承载能力又很高。图1—2所示为在相同条件下，当传动比为5时，普通齿轮传动与行星齿轮传动齿轮尺寸的比较，图中 $(d_w)_b$ 为内齿轮 b 的节圆直径，故行星齿轮传动在同功率同传动比的条件下，可使其外廓尺寸和重量只为普通齿轮传动的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{6}$ ，如图1—3所示。图中阴影线表示行星传动。同时行星齿轮传动所传递的功率很大，目前在极重要的高速、大功率行星齿轮传动中，其所传递的功率达100000(PS)^[40]，圆周速度达150~200(m/s)。

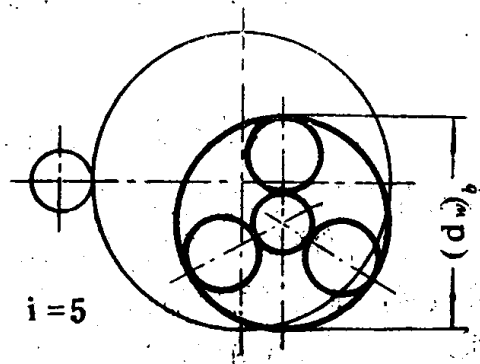


图1—2 普通齿轮传动与行星齿轮传动的齿轮尺寸比较

2.传动效率高，工作可靠。行星齿轮传动由于采用了对称的分流传动结构，使作用于中心轮和行星架等主轴承上的作用力互相平衡，使行星架与行星轮的惯性力相互平衡，有利于提高传动的效率，当传动类型选择恰当，结构布置合理时，其效率可达0.99。随着行星轮数目增多，同时位于啮合的齿数亦增多，故行星齿轮传动运转平稳，噪音小，抗冲击和振动的能力较强，因而工作很可靠。

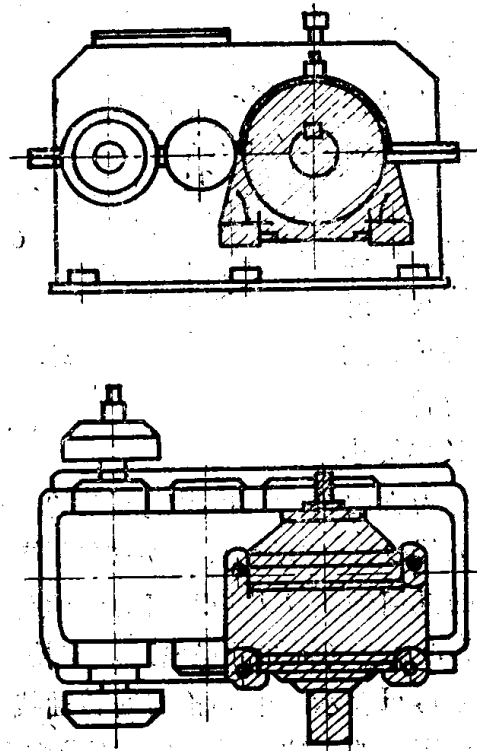


图1—3 普通定轴齿轮减速器与行星齿轮减速器外廓尺寸比较

3.传动比大，并可实现运动的合成与分解、有级变速和无级变速。只要适当选择传动类型及各齿轮的齿数，便可利用少数几个齿轮而获得很大的传动比。在不作为动力传动而主要是用以实现某一运动时，其传动比可达 10^6 。行星齿轮传动由于它的三个基本构件都可以转动，故可实现运动的合成与分解，以及实现有级和无级变速传动等复杂的运动。

表1—1列出了De Laval公司^[46]生产的传动比 $i = 7.15$ ，功率 $P = 6000$ (PS) 的行星齿轮减速箱与同工作条件下的普通定轴齿轮减速箱的比较。

由于行星齿轮传动具有上述突出的优点，故目前行星齿轮传动不仅适用于高速大功率，

而且在低速大转矩设备上也已推广采用，它几乎适用于一切功率、速度范围和一切工作条件，成为世界各国机械传动发展之重点。行星齿轮传动现在已被广泛应用于航空发动机、燃气轮机、高速汽轮机、透平式鼓风机及压缩机、船用主减速器、汽车、坦克、拖拉机、卷扬机、挖泥船、机床、机器人、仪器及仪表、轻工机械、纺织机械、工程机械、石油化工机械、矿山冶金机械、起重运输机械等各个方面。

表1-1 行星齿轮减速箱与普通定轴齿轮减速箱比较

比较项目	行星齿轮减速箱	普通定轴齿轮减速箱
重量 (N)	34020	68040
高度 (m)	1.30	1.80
长度 (m)	1.29	1.42
宽度 (m)	1.34	2.36
体积 (m ³)	2.29	6.08
齿宽 (m)	0.18	0.40
损失功率 (PS)	110	130
圆周速度 (m/s)	42.7	99.4

§ 1-3 渐开线齿轮行星传动的类型

行星齿轮传动的类型很多，不同的结构型式所能传递的功率范围、外廓尺寸和重量的大小、效率的高低和允许传动比数值、以及制造工艺的难易都相差很大。这里根据国内、外现有的行星齿轮传动，将其主要类型作如下介绍，其余特殊类型的行星齿轮传动，将在有关章节内叙述。

行星齿轮传动有各种不同观点的分类方法，在综合分析这些分类方法的基础上，提出以下较能反应行星齿轮传动实况的分类方法：

一、按所采用的基本构件组成的不同和齿轮啮合配置方式来进行分类

基本构件的代号用K代表中心轮，H代表转臂（或行星架），V代表输出轴。

1. 2K—H型行星齿轮传动

这种传动是由两个中心轮 a 、 b （即 2K）和一个转臂（H）三个基本构件组成的，故用符号 2K—H 来表示。同时又根据 2K—H 型传动中所采用的行星轮是单排（又称单齿圈行星轮）或双排（又称双齿圈行星轮），以及是内啮合还是外啮合的不同，2K—H 型又可分为很多种传动方案（或称传动类型），如图 1-4 和图 1-5 所示。

在 2K—H 型传动中，若转臂 H 固定时，中心轮 a 和 b 的回转方向相反，则这种条件下的传动比 i_{ab}^H （右上角标 H 代表固定构件）给以负号，即为 $i_{ab}^H < 0$ 的 2K—H 型传动（见图 1-4）。如果转臂 H 固定时，中心轮 a 和 b 的回转方向相同，这时传动比给以正号，即为 $i_{ab}^H > 0$ 的 2K—H 型传动（见图 1-5）。在行星齿轮传动中，当 $i_{ab}^H < 0$ 时，又称为负号机构，当 $i_{ab}^H > 0$ 时，又称为正号机构。

行星齿轮传动中，若将转臂 H 固定，所得到的传动具有一对齿轮啮合或三个齿轮相互啮合，但其中一个为惰轮者，都称为单级传动（见图 1-4、a、c 等）。若转臂 H 固定，所

得到的传动具有两对齿轮啮合者，则称为双级传动（见图1—4，*b*和图1—5，*a*、*c*等）。转臂*H*固定所得到的传动又称为准行星齿轮传动。

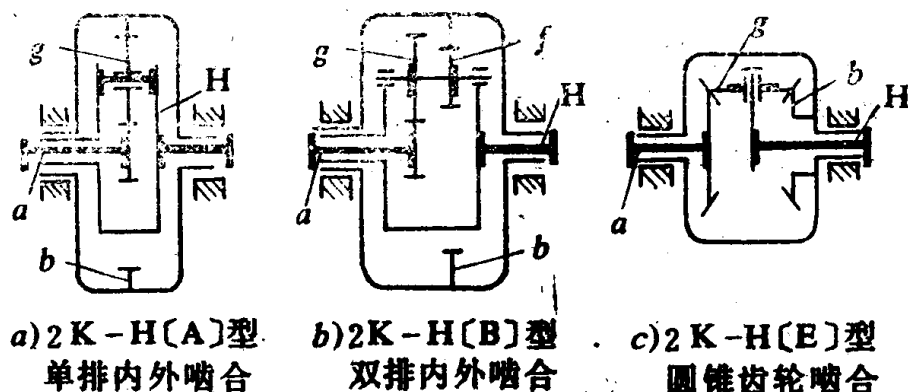


图1—4 $i_{ab}^H < 0$ 的2K-H型传动

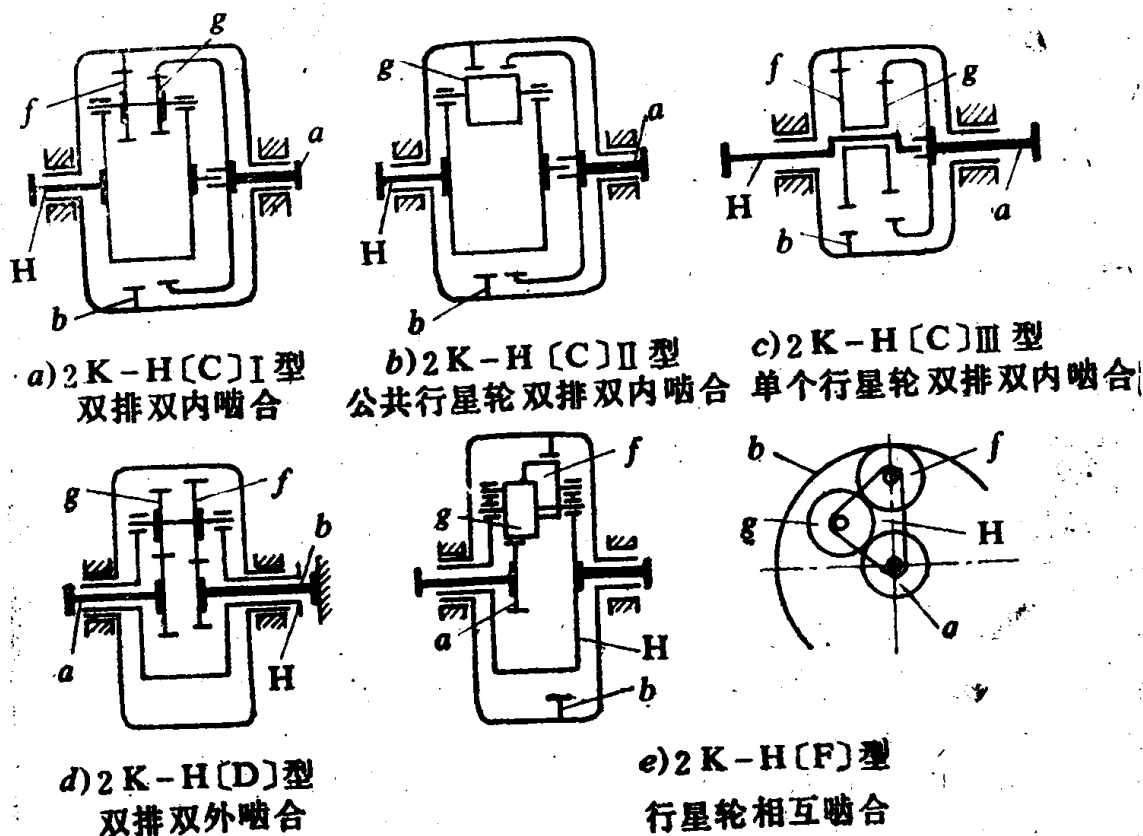


图1—5 $i_{ab}^H > 0$ 的2K-H型传动

图1—4，*a*，为单排内外啮合的2K—H[A]型，我国部颁标准JB1799—76称为NGW型行星齿轮减速器，N表示内啮合，W表示外啮合，G表示内外啮合公用行星齿轮。图1—4，*b*，为双排内外啮合的2K—H[B]型，JB1799—76称为NW型，行星轮为双齿圈（或称双联齿轮）。这两种传动类型在行星齿轮传动中应用最广。

图1—5，*a*、*b*、*c*，为双排双内啮合的2K—H[C]型（JB1799—76称为NN型），这类传动可实现大传动比。I型的行星轮为双齿圈，II型的行星轮为单齿圈公共行星轮，有良好的工艺性；III型中当采用的中心轮与行星轮啮合的齿数差接近于1时，则行星架中就只

能安装一个行星轮。这种类型的传动宜用于传递功率不大的短期或间断工作。

图1—5, *d*, 为双排双外啮合的 $2K-H[D]$ 型 (JB1799—76称为 *WW*) 型, 这种类型传动比范围很大。

图1—4, *c*, 为圆锥齿轮组成的 $2K-H[E]$ 型 (JB1799—76称为 *ZUWGW* 型, 其中 *ZU* 表示锥齿轮), 由于制造困难, 很少用作减速传动。这种类型传动主要用作差动装置。

图1—5, *e*, 为行星轮相互啮合的 $2K-H[F]$ 型, 其特点是一对或几个相互啮合的齿轮组成行星轮组, 而中心轮 *a*、*b* 分别与行星轮 *g*、*f* 组成外啮合和内啮合, 亦可构成双外或双内啮合, 或双行星齿轮传动。其中有的结构方案可实现高效率的减速传动, 有的可获得复杂的行星轮运动。

2. $3K$ 型行星齿轮传动

这种传动是由三个中心轮 *a*、*b* 和 *e* (即 $3K$) 和一个转臂 *H* 组成 (见图1—6)。基本构件是三个中心轮, 它们承受外转矩作用, 而转臂不承受转矩, 仅起支承行星轮的作用, 故用符号 $3K$ 来表示。

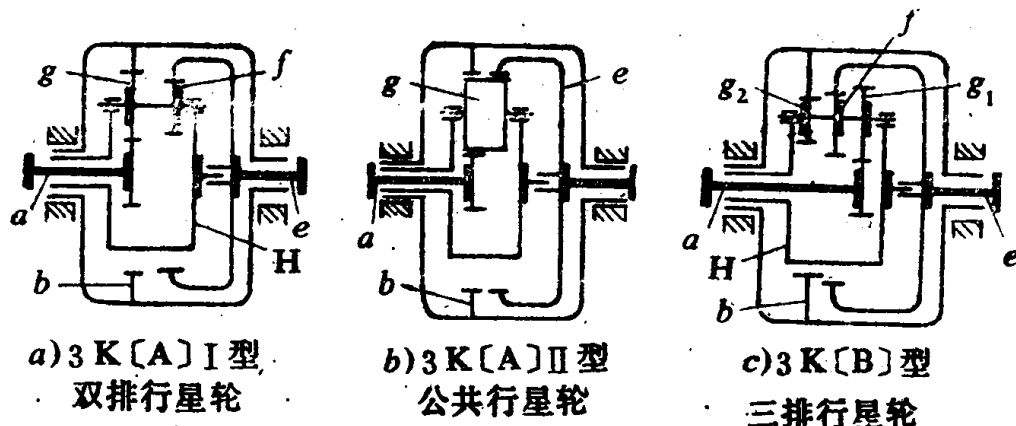


图1—6 $3K$ 型传动

图1—6, *a*, 为 $3K[A] I$ 型 (JB1799—76称为 *NGWN* 型), 它与 $3K[A] II$ 型传动 (见图1—6, *b*) 的区别是前者具有双齿圈行星轮, 而后者的行星轮则为公共行星轮。由于 $3K[A] II$ 型采用单齿圈作为公共行星轮, 故有较好的工艺性, 使这种传动的设计和制造从根本上得到了简化, 近年来应用逐渐增多。但在效率, 承载承力和外廓尺寸方面不如 $3K[A] I$ 型优越。

图1—6, *c*, 为 $3K[B]$ 型, 其行星轮有三个齿圈 *g*₁、*f*、*g*₂, 这种类型传动在行星齿轮变速箱中遇到。

3. $K-H-V$ 型行星齿轮传动

这种传动 (JB1799—76称为 *N* 型) 是由一个中心轮 *b* (即 *K*)、一个转臂 *H*、一个行星轮 *a* 和一个绕主轴线回转的输出构件 (或称输出轴) *V* 组成 (见图1—7)。基本构件是中心轮 *b*、转臂 *H* 和输出轴 *V*, 故用符号 $K-H-V$ 来表示。

这种传动的特点是将行星轮 *a* 的回转运动, 通过一个传动比等于1的中间机构传给输出轴 *V*。把行星轮 *a* 的轴线与输出轴 *V* 的轴线联接在一起, 而实现等速比传动的这个中间机构称为等角速比机构或简称 *W* 机构。 $K-H-V$ 型多用于渐开线少齿差行星齿轮传动。

二、按行星齿轮传动的活动度来分类

1. 活动度 $W = 1$ 的行星齿轮传动

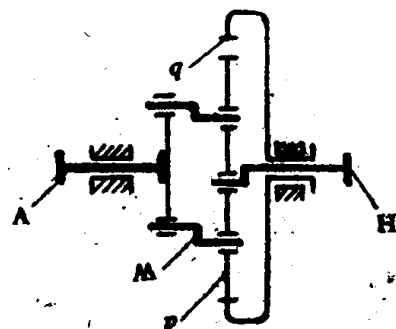


图1—7 $K-H-B-V$ 型传动

图1—8, a中, 若中心轮**b**固定, 设中心轮**a**为主动构件, 当给定齿轮**a**一定的运动后, 则运动经过行星轮**g**由转臂**H**输出, 整个传动的运动就确定了。这时运动链相对于机架的自由度称为机构的自由度, 可按确定平面机构自由度数的结构公式求出该行星机构的自由度。

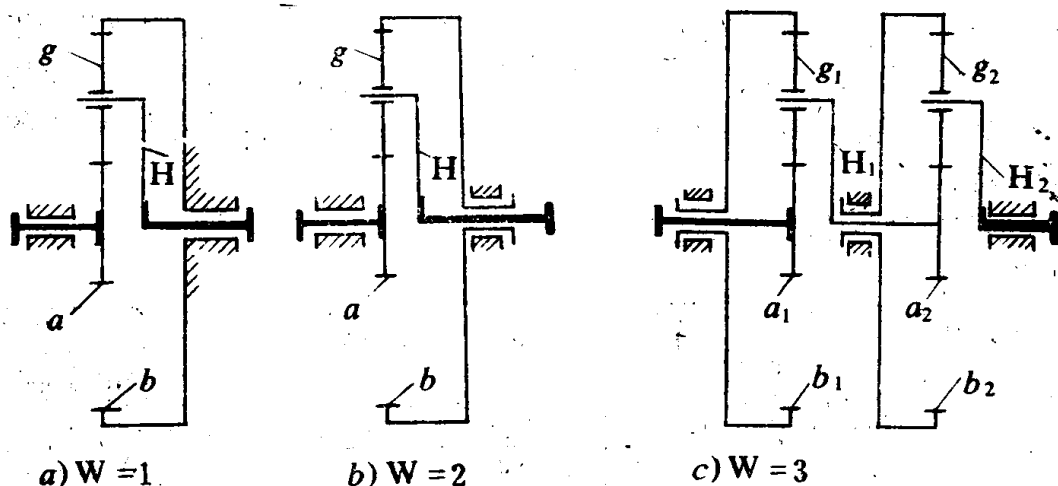


图1—8 不同活动度的行星齿轮传动

$$W = 3n - 2P_l - P_h$$

式中 n ——机构的活动构件数; P_l ——低副数; P_h ——高副数。

根据图1—8, a, 当中心轮**b**固定时, 则 $n = 3$; $P_l = 3$; $P_h = 2$;

∴ 机构的自由度 $W = 3n - 2P_l - P_h = 3 \times 3 - 2 \times 3 - 2 = 1$, 即此时该行星机构只有1个自由度。这种自由度为1的行星齿轮机构通常称为行星齿轮传动 (或行星齿轮机构), 也称为行星轮系。

2. 自由度 $W = 2$ 的行星齿轮传动

图1—8, b中, 若中心轮 (内齿轮) **b** 也是活动的, 当只给定中心轮 **a** 一确定的输入运动时, 其余构件的运动是不确定的, 若要使传动其余构件具有确定的运动, 还必需给定内齿轮 **b** 或转臂 **H** 一确定的运动后, 输出运动才能完全确定。也就是说传动要分别给定两个构件各自确定的输入运动后, 机构才有确定的输出运动。因为这时传动的自由度 W 按图1—8, b:

$$n = 4; P_l = 4; P_h = 2;$$

$$\therefore W = 3n - 2P_l - P_h = 3 \times 4 - 2 \times 4 - 2 = 2$$

即此时机构的自由度为2。自由度为2的行星齿轮机构通常称为差动行星齿轮传动或称差动传动 (也称为差动轮系)。

3. 多自由度行星齿轮传动

图1—8, c为两个 $2K-H[A]$ 型串联起来的双级 $2K-H[A]$ 型行星齿轮传动。该机构的活动构件数 $n = 7$, 低副数 $P_l = 7$, 高副数 $P_h = 4$, 故机构自由度 $W = 3n - 2P_l - P_h = 3 \times 7 - 2 \times 7 - 4 = 3$ 。机构自由度 $W \geq 3$ 的行星齿轮机构, 通常称为多自由度 (或称多自由度) 行星齿轮传动。这类传动常用作变速传动装置, 目前应用愈来愈广泛。

三、按中心轮与转臂之间或两个中心轮之间是否形成封闭运动链来分类

在差动行星齿轮传动中, 若中心轮 (**a** 或 **b**) 与转臂 **H** 之间或两个中心轮 **a** 与 **b** 之间不构成封闭运动链, 则这种行星齿轮传动称为开式行星齿轮传动, 如图1—8, b所示。若中

心轮与转臂之间或两个中心轮之间形成封闭运动链，则称为封闭差动行星齿轮传动，或称封闭差动传动（或称封闭差动轮系），如图1—9所示。

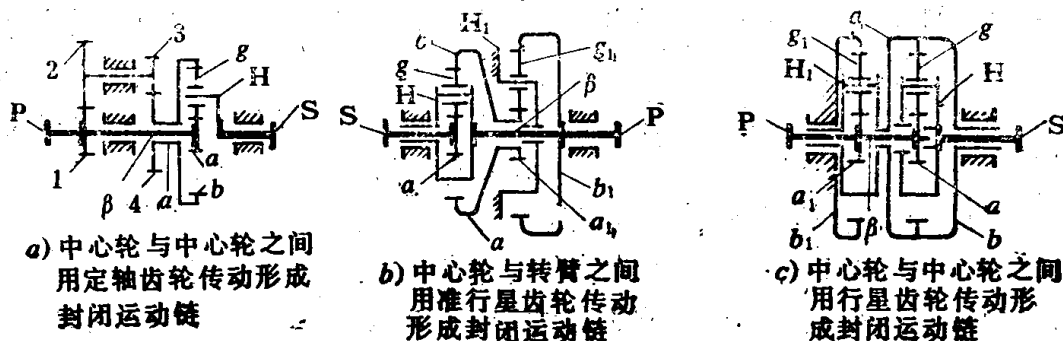


图1—9 P—S型封闭差动行星齿轮传动

差动行星齿轮传动构成封闭差动行星齿轮传动后，其活动度就由2变为1，如图1—9所示。这时机构的活动构件数 $n = 5$ ，低副数 $P_l = 5$ ，高副数 $P_h = 4$ ，故活动度 W 为

$$W = 3n - 2P_l - P_h = 3 \times 5 - 2 \times 5 - 4 = 1。$$

生产实践中，封闭差动行星齿轮传动，大多数都是以2K—H型传动为基础，用定轴轮系或行星轮系等来封闭构成的，因此下面只讨论具有2K—H型传动的封闭差动行星齿轮传动。为了研究和设计方便，以及应用运动学和动力学中现成的公式（如传动比计算公式、确定效率公式等），现将封闭差动行星齿轮传动中各基本构件的代号作如下规定：若2K—H型差动传动中的一个基本构件直接同伸出轴（即封闭差动行星齿轮传动的输出轴之一）相联接，则该伸出轴（即该基本构件）用字母S表示，与该伸出轴刚性联接一起回传的齿轮或转臂也用同样的符号。为了在任何复杂的封闭差动行星齿轮传动中迅速、准确地找出基本构件S，即定出哪一根伸出轴应标以代号S，应遵循如下规定，即封闭差动行星齿轮传动中只有一个中心齿轮或只有一个转臂刚性地同伸出轴联接，该伸出轴就标以S（见图1—9），而有构件S的差动传动的另外两个基本构件用字母 α 和 β 表示。若这两个基本构件是中心轮，则 α 和 β 分别代表哪一个中心轮都可以，若这两个基本构件中有一个是转臂，则转臂就固定用字母 β 表示，另一基本构件用字母 α 表示（见图1—9，b），代号为S或 β 的构件若是转臂，则除具有代号S或 β 外还应保留转臂代号H（见图1—9）。该封闭差动行星齿轮传动的另一伸出轴则用字母P表示。基本构件 α 和 β 利用某种传动与字母P表示的伸出轴相联接，这样得到的封闭差动行星齿轮传动，根据伸出轴代号简称P—S型传动。与差动传动基本构件 α β 相联接的传动，用符号 α —P和 β —P来表示。封闭运动链除用定轴齿轮传动、行星齿轮传动构成外，还可以用液力传动、电力传动或其它传动来构成。P—S型传动在构成有级和无级传动、变速传动装置等方面得到了愈来愈广泛的应用。

§ 1—4 渐开线齿轮行星传动的发展概况

我国是发明齿轮和应用齿轮传动最早的国家，早在西汉时代（约一世纪）已应用了铸铜齿轮，东汉时代（公元78~139年）张衡已用了较复杂的齿轮系。特别是在行星齿轮传动方面，我国早在南北朝时代（公元429~500年），世界闻名的伟大科学家祖冲之创造发明了有行星齿轮的差动式指南车，如图1—10

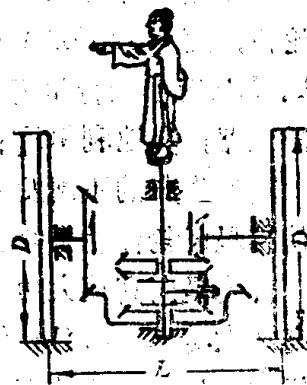


图1—10 具有差动行星齿轮传动的指南车

所示。这种由圆锥齿轮构成的差动行星齿轮传动能保证“圆转不穷，而司方如一”，因此，我国行星齿轮传动的应用比欧美各国早一千三百多年。

在国外，公元1765年，Л·Эйлер提出用渐开线作为齿廓曲线，使定轴轮系的齿轮传动在机械传动中获得了最广泛的应用，但是，随着生产发展的需要，在十八世纪J·Watt就在蒸汽机上首次应用了行星齿轮传动来代替曲柄驱动飞轮轴，使飞轮轴的转速得以提高，飞轮重量就可以相应地制造得更轻些。1867年英国Eades研制的差动滑车中，已把行星齿轮传动装置用作差动传动。1875年Reuleaux^[60]在他出版的“理论运动学”教科书中描述了行星齿轮传动的原理及其装置。1879年Bock^[60]在一份有差动齿轮传动装置的报告中就论述了传动比 $i = 10^6$ 的行星锥齿轮传动装置，并指出了行星齿轮传动的安装问题。继后Shaw发表了传动比 $i = 2 \times 10^5$ 的行星机构，以及苏联Говриленко用串联K—H—V型行星传动获得了传动比 $i = 10^8$ 的行星齿轮机构。当时，这些大传动比的行星齿轮机构主要是用以实现某一运动，而另一些类型的行星齿轮传动则用在较复杂的控制系统和分配系统中。

根据Breuer介绍，德国第一个行星齿轮传动装置的专利出现于1880年。而1885年德国Daimler则以第一辆汽车的结构指出了行星齿轮传动的广泛应用范围。十九世纪以来，随着机械工业的发展，特别是汽车和航空工业的发展，对行星齿轮传动的发展有很大影响，例如，在1920年首次成批制造出了行星齿轮传动装置，并首先用作汽车的差速器。大约从1938年起就开始集中发展汽车使用的行星齿轮传动装置。1929年法国Gebruder Henri和Farman研究成功锥齿轮行星齿轮传动装置，世界各先进工业国家亦先后研制成各种类型的行星齿轮传动装置，它们都是以部件的形式供飞机驱动使用。从1924年以来，就制造出了有效负荷达 3×10^5 (N)的重型箱式卷扬机用的行星齿轮传动装置，以及有效负荷达 3.5×10^6 (N)的起重机和桥式吊车用的行星齿轮传动装置。

根据Stoekicht专利，从1935年起，首先开始制造了供通用机械使用的行星齿轮传动装置。Stoekicht在理论上首先提出了关于行星轮间载荷均匀分配的柔性浮动自位概念。特别是第二次世界大战后，高速大功率船舰、透平发电机组和透平压缩机组、航空发动机以及工程机械等的发展，对渐开线齿轮行星传动在速度、功率、效率、外廓尺寸和重量等诸方面提出了愈来愈高的要求，从而使渐开线齿轮行星传动得到了迅速的发展。

高速大功率行星齿轮传动及通用行星齿轮传动广泛的实际应用，于1951年首先在西德获得成功。1958年后，英、意、日、美、荷、捷、苏、瑞士等国亦获得成功，并已成批生产使用，其中在国际上享有盛名的有：西德BHS、Renk、Krupp、DEMAG、VOITH和FWH行星齿轮箱；英国Allen和C.O.G. Vickers行星齿轮箱；美国Stal Laval、Fritsch行星齿轮箱；捷克SKODA (PRn型和TS型)行星齿轮箱；日本IMT, Seia行星齿轮箱和LD、RA、LM超小型行星齿轮减速器；瑞士Maag行星齿轮箱；法国RPL—F行星及马达行星齿轮减速器；奥地利SGP行星齿轮箱等。

随着生产的不断发展，制造技术的不断进步，以及行星齿轮传动在设计上日趋完善，从而使行星齿轮传动至今已达到了较高水平。目前行星齿轮传动正向以下几个方面发展：

首先是向高速大功率、高效率及低速大扭矩的方向发展。现今渐开线齿轮传动不仅适用于高速大功率，而且在低速大扭矩设备上也已推广采用，例如年产三十万吨的合成氨透平压缩机的行星齿轮增速箱，其齿轮圆周速度达 150 (m/s)；日本Toyo Seimitsu Zohki公司生产了巨型船舰推进系统用的行星齿轮箱，其功率为 30000 (PS)，而在试验时，封闭功率

试验到35000 (PS)。在一些大型船用主推进系统中,成功地应用了行星齿轮箱,其传动效率达0.99;在大型水泥磨中所用的80/125型行星齿轮箱,其输出扭矩高达4150c kN·m)。

其次是行星齿轮传动正向无级变速行星齿轮传动方向发展。多年来一直需要一种传递大功率、高效率、变速比的传动装置(机械无级变速),这对行星齿轮传动来说,实现无级变速就是让行星齿轮传动中三个基本构件都转动并传递功率,这只要对原行星机构中固定的构件附加一个转动(采用封闭油路系统中液压泵及液压马达的方式来实现),就能使输出转速有所增减,从而获得变速比的机械无级变速器。现已制成能传递功率2000 (PS) 以上的无级变速行星齿轮箱。

第三是行星齿轮传动向复合式行星齿轮箱发展。近年来国内外将蜗杆传动、螺旋齿轮传动、圆锥齿轮传动等与行星齿轮传动组合使用,构成复合式行星齿轮箱。高速级用前述各种类型传动,低速级用行星齿轮传动,这种齿轮箱可适应相交轴和交错轴间的传动,可实现大传动比和大扭矩输出等各种不同的用途,同时又充分有效地利用了各种类型传动的特点,克服了相互的弱点,也能适应市场上多样化的需要。例如制碱工业澄清桶用蜗杆蜗轮—行星齿轮减速器,总传动比 $i = 4462.5$,输出轴转速为0.215 (r/min) 其输出扭矩为27200(N·m)。

第四是行星齿轮传动向少齿差行星齿轮传动方向发展。渐开线少齿差行星齿轮传动是其中之一,从六十年代以来,国内外发展很快,主要用于大传动比、小功率传动,单级传动比可达115,大多数传递的功率小于10 (kW),效率可达0.8~0.9。我国已制成的这类减速器最大功率为45 (kW)。

此外,将无级变速器、液力联轴器、变矩器等与行星齿轮箱联合使用,以及多自由度的行星齿轮箱都有很大的发展,这也是值得注意的发展方向。在齿轮材质、热处理和制造方面,倾向于采用优质钢材,并经硬化处理获得高硬齿面,同时采用高制造精度和高表面光洁度,这有利于充分发挥齿轮齿面和齿根强度的潜力,发挥行星齿轮传动的特点。行星齿轮传动几乎适应于一切功率、速度范围和一切工作条件,受到了世界各国很大的注意,成为世界各国在机械传动方面的发展重点。

我国为了适应国际上这种引人注意的发展,从六十年代起,在研究部门、厂矿企业和高等院校密切配合下,先后在有关单位试制成功列车电站燃汽轮机(3000kW)、工业用高速汽轮机(500kW)和万立方米制氧透平压缩机(6300kW)的行星齿轮箱,以及与石油化工用的透平机械配套的一些不规格的行星齿轮箱,其最高转速已达27000 (r/min)。为了推广渐开线齿轮行星传动的应用,一机部组织了NGW渐开线行星齿轮减速器系列工作组,制定了NGW(即2K—H[A])型渐开线行星齿轮减速器标准系列JB1799—76。一些专业定点厂已成批生产了NGW型标准系列产品,使用效果很好。全国各地能制造各种类型的行星齿轮传动的工厂日益增多,产品性能和质量深受用户欢迎。值得注意的是渐开线少齿差行星齿轮传动的设计、制造和应用近年来也发展较快,年产量总计已达1万台以上。目前渐开线齿轮行星传动在国内外已受到各个方面的重视,并正大力推广其应用。一些研究部门和高等院校,目前正从事于行星齿轮传动的运动学、几何学、动力学、浮动、均载、参数优选、行星传动装置优化设计、制造工艺等问题的研究,以及行星齿轮传动的试验和测试技术方面的研究,以扩大在高速和变速工作的应用范围,扩大在各个领域的应用范围,为四个现代化作出贡献。