

# 行星轮系与多级齿轮传动系统 动态性能与传动设计优化研究

王均刚 著



合肥工业大学出版社



# 行星轮系与多级齿轮传动系统 动态性能与传动设计优化研究

王均刚 著



## 图书在版编目(CIP)数据

行星轮系与多级齿轮传动系统动态性能与传动设计优化研究/  
王均刚著. —合肥:合肥工业大学出版社,2018.8

ISBN 978-7-5650-4080-1

I. ①行… II. ①王… III. ①行星齿轮传动—研究 IV. ①TH132.425

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 181494 号

## 行星轮系与多级齿轮传动系统动态性能与传动设计优化研究

王均刚 著

责任编辑 吴毅明 袁媛

---

出版	合肥工业大学出版社	版次	2018年8月第1版
地址	合肥市屯溪路193号	印次	2018年8月第1次印刷
邮编	230009	开本	710毫米×1010毫米 1/16
电话	艺术编辑部:0551-62903120 市场营销部:0551-62903198	印张	18
网址	www.hfutpress.com.cn	字数	360千字
E-mail	hfutpress@163.com	印刷	安徽联众印刷有限公司
		发行	全国新华书店

---

ISBN 978-7-5650-4080-1

定价:38.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

# 前 言

行星轮系传动是一种比较先进的齿轮传动装置,它具有传动比大、体积小、重量轻、材料消耗少、输入与输出轴同轴等优点。因此,在陆用、航海、航空等交通运输工具和风力发电装备等工程领域中得到广泛应用。随着能源短缺和生态环境的日益恶化,人们普遍认识到了风力发电技术的重要性。风电行星齿轮被用于增速传动,其承受的载荷非常复杂,是风力发电机组故障率最高的部件之一。近几年,国内外学者日益重视风力发电用行星轮系齿轮传动技术的研究,并取得了许多重大成果。

与单级行星轮系传动装置相比,行星轮系多级齿轮传动系统的结构更加复杂,在运行中,行星齿轮既有公转运动又有自转运动,既有级内的太阳轮、行星轮和内齿圈之间的啮合传动,又存在轮系之间的耦合传动。在运行的可靠性等方面,国产的行星齿轮传动系统与国外一流产品相比还有较大的差距,为了降低行星齿轮传动系统的故障率,提高其工作寿命和可靠性,有必要对行星轮系多级齿轮传动设计和动态性能进行深入研究。

本书的主要对象为风电增速箱用行星轮系多级齿轮传动系统,主要目的是系统而扼要地论述行星轮系多级齿轮传动系统在风电传动装置中的应用,主要采用理论分析方法、有限元方法和实验方法等研究方法。本书主要内容包括:

(1)提出一种风电增速箱用载荷分流式两级增速行星轮系传动机构,并对该机构的运动学进行研究。应用转化机构法和行星轮系传动构件间的普遍公式,推导了该新型增速传动机构各构件的运动学方程和总传动比方程。在系统输入转速一定的情况下,随着第一级行星轮系的行星排特性参数的

增大,第一级行星轮系太阳轮的输出转速增加。第二级行星轮系行星齿轮的输出转速与系统输入转速的方向相反,随着系统输入转速的增加,行星齿轮的输出转速的绝对值增大。

(2)采用显式瞬态动力学有限元方法对载荷分流式增速行星齿轮传动系统的第一级行星轮系齿轮副啮合过程进行了仿真分析。研究表明行星齿轮副的啮合面和非啮合面齿根的各个测点的等效应力具有相似的变化趋势。

(3)研究温差对载荷分流式增速行星轮系的内啮合和外啮合行星齿轮齿廓的齿顶等效应力、节圆等效应力和齿根等效应力的影响。进而分析温差与行星齿轮齿廓的齿顶、节圆和齿根节点的应力的关系;在此基础上研究了温差对载荷分流式增速行星齿轮传动机构第一级行星齿轮副动态特性的影响。结果表明温差对行星齿轮啮合面和非啮合面齿廓的齿顶、节圆和齿根的等效应力有明显的影晌。

(4)研究耦合刚度与级间耦合振动模式的关系。该行星传动系统具有级间的耦合和增速的特点与级间的均载系数差异性的关系。级间耦合振动模式对应的各阶频率随着第一级行星架和第二级内齿圈的耦合刚度的增加而增大,也随着第一级太阳轮和第二级行星架的耦合刚度的增加而增大,并且该传动系统振动模式的类型不随级间耦合刚度的变化而改变。

(5)由于该行星传动系统具有级间的耦合和增速的特点,系统的均载系数较大,级间的均载系数具有差异。分析的结果可以作为对增速行星轮系传动系统进行动力学研究的基础,以便控制系统级间均载特性的差异,减小振动和噪声,提高系统的传动质量和寿命。

本书对行星轮系多级行星齿轮传动系统进行了研究,取得了阶段性的研究成果,创新性主要体现在以下几个方面:

(1)建立了载荷分流式两级行星轮系和一级平行轴齿轮增速行星齿轮传动系统的动力学模型,推导了该传动系统的动力学微分方程。区别于单级行星轮系的动力学建模方法。

(2)发现了级间耦合刚度对载荷分流式增速行星齿轮传动系统振动模

式的影响规律,推导了该传动系统的各行星齿轮副内外啮合的周期均载系数表达式,阐明了该传动系统均载性能的特点规律。区别于单级减速行星轮系,该传动系统具有增速和级间耦合的特点,均载系数较大,级间均载性能具有明显的差异性。

(3)采用理论分析和实验验证相结合的方法,定义了行星轮系各构件的特征频率,发现了行星齿轮传动系统的动态信号的频域构成的规律性。行星齿轮传动系统的动态信号的频率成分非常丰富,峰值信号对应的频率与行星轮系的啮合频率、各构件的特征频率和行星架的旋转频率有关。

(4)提出了基于冲击力分载的风电齿轮箱载荷抑制新方法,用来改善风电齿轮箱的承载性能。通过改进风电齿轮箱的传动结构,实现冲击力路径分散传递,抑制风电增速箱的振动,降低风电增速箱的故障率,就可以显著提高齿轮传动机构的承载能力。

(5)提出了行星轮系偏载抑制新方法,通过同时采用承受单向扭矩的行星齿轮组和承受双向扭矩的行星齿轮组来共同实现均载,能够降低动载荷的冲击,能有效抑制行星排偏载,提高风电增速箱传动性能。与承受双向扭矩行星齿轮组不同,单向受扭均载组的每个行星轮总是承受单向扭矩,在运转过程中所承受的扭矩载荷方向变化不频繁,能够降低动载荷的冲击,可以有效抑制行星排偏载的影响,提高行星排的承载能力。

(6)提出了在风电增速箱中注入弹性和阻尼形成附加自由度从而实现风电齿轮箱抗振减噪的新方法。通过研究影响系统的动力学振动特性参数,实现降低风电增速箱的扭转振动和冲击载荷响应,避免共振现象的产生。为风电增速箱的抗振减噪,提供了一种可靠途径。

本书得到国家自然科学基金项目(课题编号:51765020),江西省自然科学基金资助项目(课题编号:20161BAB206153)和华东交通大学博士科研启动基金的支持。

作者结合自身多年从事行星齿轮传动设计科研和教学经历,主要以所发明设计的新型行星轮系多级齿轮传动结构为研究对象,阐述行星轮系齿轮传动的原理和结构,研究其设计优化方法和动态性能,以启发读者的创新

思路,为读者的创新研究提供有益的参考。书中广泛吸收了众多科研工作者有关齿轮传动设计方面的教学经验和研究成果,本书可以作为高等学校的研究生和从事齿轮传动设计的科研工作者的参考书。

本书是有关新型行星轮系齿轮与多级齿轮传动系统的专著,新内容涉及新的领域而作者水平有限,书中存在不少疏漏错误之处,敬请广大读者批评指正。

王均刚

2018年3月于华东交通大学

# 主要符号说明

符号	含义	单位
$n_{1j} (j=c, s, r, p)$	第 1 级行星轮系构件 $j$ 的转速; $c, s, r, p$ 分别表示行星架、太阳齿轮、内齿轮和行星齿轮	r/min
$\lambda_1$	第 1 级行星轮系行星排特性参数	
$Z_{1j} (j=r, s, p)$	第 1 级行星轮系构件 $j$ 的齿数	
$i_{1a1d}^{1x} (a, d, x=c, s, r, p)$	第 1 级行星轮系的构件 $a$ 与构件 $x$ 的相对转速和构件 $d$ 与构件 $x$ 相对转速之比	
$n_{2j} (j=c, s, r, p)$	第 2 级行星轮系构件 $j$ 的转速	r/min
$\lambda_2$	第 2 级行星轮系行星排特性参数	
$Z_{2j} (j=r, s, p)$	第 2 级行星轮系构件 $j$ 的齿数	
$i_{2a2b}^{2x} (a, b, x=c, s, r, p)$	第 2 级行星轮系的构件 $a$ 与构件 $x$ 的相对转速和构件 $b$ 与构件 $x$ 相对转速之比	
$p_j (j=1, 2, \dots, n)$	第 $j$ 个行星齿轮的下标	
$g_1, g_2$	第 3 级主动齿轮和被动齿轮的下标	
$\theta_{ij} (i=1, 2, 3;$ $j=s, r, c, p_1, p_2, \dots, p_n, g_1, g_2)$	分别表示第 $i$ 级行星传动的构件 $j$ 绕其回转中心的角位移	rad
$E_{ispj} (j=1, 2; i=1, 2, \dots, n)$	第 $i$ 级行星轮系太阳轮与第 $j$ 个行星齿轮的啮合误差	$\mu\text{m}$



(续表)

符号	含义	单位
$E_{irpj} (i=1,2;j=1,2,\dots,n)$	第 $i$ 级行星轮系内齿圈与第 $j$ 个行星齿轮的啮合误差	$\mu\text{m}$
$E_{3g_1g_2}$	第 3 级平行轴传动的主动齿轮与被动齿轮的啮合误差	$\mu\text{m}$
$K_{ispj} (i=1,2;j=1,2,\dots,n)$	第 $i$ 级行星轮系太阳轮与第 $j$ 个行星齿轮的啮合刚度	$\text{N/m}$
$K_{irpj} (i=1,2;j=1,2,\dots,n)$	第 $i$ 级行星轮系内齿圈与第 $j$ 个行星齿轮的啮合刚度	$\text{N/m}$
$K_{3g_1g_2}$	第 3 级平行轴传动的主动齿轮与被动齿轮的啮合刚度	$\text{N/m}$
$K_{1c2r}$	第 1 级行星轮系行星架与第 2 级行星轮系内齿圈的耦合刚度	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
$K_{1s2c}$	第 1 级行星轮系太阳轮与第 2 级行星轮系行星架的耦合刚度	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
$K_{2s3g_1}$	第 2 级行星轮系太阳轮与第 3 级平行轴传动的耦合刚度	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$
$C_{ispj} (i=1,2;j=1,2,\dots,n)$	第 $i$ 级行星轮系太阳轮与第 $j$ 个行星齿轮的啮合阻尼系数	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
$C_{irpj} (i=1,2;j=1,2,\dots,n)$	第 $i$ 级行星轮系内齿圈与第 $j$ 个行星齿轮的啮合阻尼系数	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
$C_{3g_1g_2}$	第 3 级平行轴传动的主动齿轮与被动齿轮的啮合阻尼系数	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$
$C_{1c2r}$	第 1 级行星轮系行星架与第 2 级行星轮系内齿圈的扭转阻尼系数	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{rad}$
$C_{1s2c}$	第 1 级行星轮系太阳轮与第 2 级行星轮系行星架的扭转阻尼系数	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{rad}$
$C_{2s3g_1}$	第 2 级行星轮系太阳轮与第 3 级平行轴传动的扭转阻尼系数	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{rad}$

(续表)

符号	含义	单位
$T_i$	输入转矩	$\text{N} \cdot \text{m}$
$T_o$	输出转矩	$\text{N} \cdot \text{m}$
$I_{1ce}$	第 1 级行星轮系的行星架的等效转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$M_{1p}$	第 1 级行星轮系的行星齿轮的质量	$\text{kg}$
$1N$	第 1 级行星轮系的行星齿轮的总个数	
$I_{1j} (j=c, s, p_1, p_2, \dots, p_{1N})$	第 1 级行星轮系构件 $j$ 绕其回转中心的转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$\alpha_{1s}$	第 1 级行星轮系太阳轮和行星齿轮啮合角	°
$\alpha_{1r}$	第 1 级行星轮系齿圈和行星齿轮啮合角	°
$I_{2ce}$	第 2 级行星轮系的行星架的等效转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$M_{2p}$	第 2 级行星轮系的行星齿轮的质量	$\text{kg}$
$2N$	第 2 级行星轮系行星齿轮的总个数	
$I_{2j} (j=c, s, p_1, p_2, \dots, p_{2N})$	第 2 级行星轮系构件 $j$ 绕其回转中心的转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$\alpha_{2s}$	第 2 级行星轮系太阳轮和行星齿轮啮合角	°
$\alpha_{2r}$	第 2 级行星轮系齿圈和行星齿轮啮合角	°
$r_{rbd} (i=1, 2, 3; d=s, r, g_1, g_2, p_1, p_2, \dots)$	第 $i$ 级齿轮传动系统 $d$ 构件的基圆半径	$\text{m}$

## 目 录

第 1 章 绪 论 .....	(001)
1.1 背景及意义 .....	(001)
1.2 行星齿轮传动机构的研究现状 .....	(002)
1.3 国内外齿轮动态性能研究现状 .....	(005)
1.4 行星齿轮传动存在的重要问题 .....	(011)
第 2 章 行星轮系多级齿轮传动系统的运动学分析与传动参数优化设计 .....	(014)
2.1 载荷分流式多级行星增速传动机构 .....	(015)
2.2 载荷分流式增速行星齿轮传动机构的运动学分析 .....	(016)
2.3 载荷分流式两级行星传动机构优化设计 .....	(023)
2.4 优化实例 .....	(028)
第 3 章 行星轮系与多级行星齿轮传动系统固有特性和均载特性 .....	(032)
3.1 行星轮系均载传动机构 .....	(033)
3.2 风电增速箱用单级行星齿轮传动固有特性分析 .....	(040)
3.3 载荷分流式多级行星齿轮传动系统的力学建模 .....	(054)
3.4 载荷分流式多级行星齿轮传动系统均载特性分析 .....	(075)
第 4 章 风电增速箱用行星轮系瞬态啮合特性 .....	(081)
4.1 接触问题的非线性有限元数值解 .....	(082)

4.2	有限元分析模型的建立 .....	(084)
4.3	行星轮系接触啮合的有限元分析 .....	(088)
4.4	齿廓不同啮合位置的动态特性分析 .....	(094)
4.5	工况参数对行星齿轮副动力学行为的影响 .....	(096)
<b>第5章</b>	<b>温差对行星轮系传动的影响分析 .....</b>	<b>(105)</b>
5.1	热应力分析 .....	(105)
5.2	温差的模拟 .....	(107)
5.3	温差对应力的影响 .....	(110)
5.4	温差对载荷分流式增速行星齿轮传动的影响 .....	(114)
<b>第6章</b>	<b>大功率风电增速箱多级行星传动机构的高速级齿轮副非线性分叉特性研究 .....</b>	<b>(120)</b>
6.1	大功率风电增速箱多级行星齿轮传动机构 .....	(121)
6.2	大功率风电增速箱多级传动高速级齿轮非线性动力学模型 .....	(121)
6.3	内激励参数对系统非线性分叉特性的影响 .....	(123)
6.4	不同支撑刚度条件下多级行星传动机构的高速级齿轮副非线性分叉特性 .....	(136)
<b>第7章</b>	<b>行星轮系多级齿轮传动设计与抑制行星轮系偏载和降低行星轮系冲击力新方法 .....</b>	<b>(170)</b>
7.1	行星轮系多级齿轮系统整体传动方案设计 .....	(171)
7.2	齿轮的设计 .....	(176)
7.3	轴的基本设计 .....	(180)
7.4	传动连接件的设计 .....	(182)
7.5	行星架、轴承与轴的最终设计 .....	(185)
7.6	部分关键零件的校核 .....	(188)
7.7	部分零件实体建模与总体装配仿真分析 .....	(194)

7.8	部分关键零件的有限元分析 .....	(203)
7.9	一种可降低冲击力的行星齿轮传动设计方法 .....	(216)
7.10	一种能够抑制行星轮系偏载的多级齿轮传动机构设计方法 .....	(219)
<b>第8章</b>	<b>附加自由度减振系统及其在风电增速箱振动控制中的应用</b> .....	<b>(223)</b>
8.1	附加自由度减振系统 .....	(223)
8.2	附加自由度减振参数分析 .....	(226)
8.3	附加自由度减振系统在风电增速箱中应用实验仿真研究 .....	(230)
<b>第9章</b>	<b>行星齿轮传动系统的实验研究 .....</b>	<b>(233)</b>
9.1	引言 .....	(233)
9.2	行星齿轮传动系统的模拟实验台 .....	(233)
9.3	行星齿轮传动系统的模态实验 .....	(234)
9.4	行星齿轮传动系统的振动信号的频域分析 .....	(239)
<b>参考文献</b>	.....	<b>(246)</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 背景及意义

近几年各国纷纷鼓励风电产业的发展,全球风力发电装机容量快速增长。虽然中国风能资源丰富,但目前全国风电装机容量还不到其资源储量的千分之五。为了更有效地利用风能资源,国家发展改革委员会制定了《国家风力发电中长期发展规划》,提出到 2020 年,全国风电装机容量达到 3000 万千瓦的总体目标。

虽然国内众多专家学者对风电齿轮箱的工作性能进行了研究分析,但齿轮箱仍是近年来故障率最高的部件之一。风力发电机通常在野外环境工作,增速行星齿轮安装在高空中,其工作的环境恶劣、载荷情况复杂,并且在瞬时加速的过程中,载荷突然增加,会对齿轮造成很大的冲击。不仅尺寸大而且同时存在内啮合和外啮合,行星传动齿轮副的动态激励比较复杂,其接触行为也比较复杂。行星轮系具有多个行星齿轮,传动构件多,运动情况复杂,行星齿轮动态特性会严重影响到增速行星齿轮传动系统的工作性能和使用寿命。风电增速箱是风力发电机组的关键部件,作为其主要组成部分的行星齿轮增速传动系统的动态性能非常重要,故十分有必要对其动态特性进行深入的分析研究。为了降低故障率,提高其工作寿命和可靠性,有必要对行星齿轮传动的动态性能进行深入研究。对新型载荷分流式增速行星齿轮传动机构的动态性能研究有利于提高风电齿轮箱的可靠性和降低故障率,具有十分重大的理论和工程意义。

我国制造企业在核心技术上基本处于引进吸收和模仿阶段,尚未具备

系统性的装备自主研发能力;装备制造企业的技术能力与实际的设备可靠运行要求之间还存在着显著的差距。从装备服役运行中的主要技术问题做起,提升自主设计能力及制造技术能力,已成为我国风电装备制造产业健康发展的重大课题。探究行星轮系多级齿轮传动原理,开展基于行星轮系的多级齿轮传动设计理论,对行星齿轮传动的动态性能进行深入研究,有助于提升我国大型装备的先进设计水平与竞争力,降低齿轮箱的故障率和提高服役可靠性,促进我国装备产业的发展。

## 1.2 行星齿轮传动机构的研究现状

行星齿轮传动的结构形式尽管多种多样,但都包括了简单的行星轮系。简单行星轮系的各构件的组合形式及其对应的传动比,见表 1-1 所列,表中  $Z_s$  是太阳轮齿数,  $Z_r$  是内齿圈齿数。

表 1-1 简单行星轮系各构件的组合形式

输入构件	输出构件	固定构件	传动比
太阳轮	行星架	内齿圈	$(Z_s + Z_r) / Z_s$
内齿圈	行星架	太阳轮	$(Z_s + Z_r) / Z_r$
行星架	太阳轮	内齿圈	$Z_s / (Z_s + Z_r)$
行星架	内齿圈	太阳轮	$Z_r / (Z_s + Z_r)$
太阳轮	内齿圈	行星架	$-Z_r / Z_s$
内齿圈	太阳轮	行星架	$-Z_s / Z_r$

由表 1-1 可知简单行星轮系有三个基本构件,分别为太阳轮、行星架和内齿圈,可以有六种形式的输入和输出组合,每种组合都对应着一定的传动比,有的是增速传动,有的是减速传动,输入构件和输出构件的转速可能是同方向,也有可能是反方向。

风电增速箱的行星齿轮传动系统是用来增速的,常采用行星架或内齿圈输入的组合形式。目前风电行星齿轮增速传动机构主要包括:单级行星

轮系与二级平行轴传动机构、二级行星轮系与一级平行轴传动机构、复合行星轮系与一级平行轴传动机构等。

单级行星轮系与二级平行轴结构的行星齿轮增速传动机构简图,如图 1-1 所示。

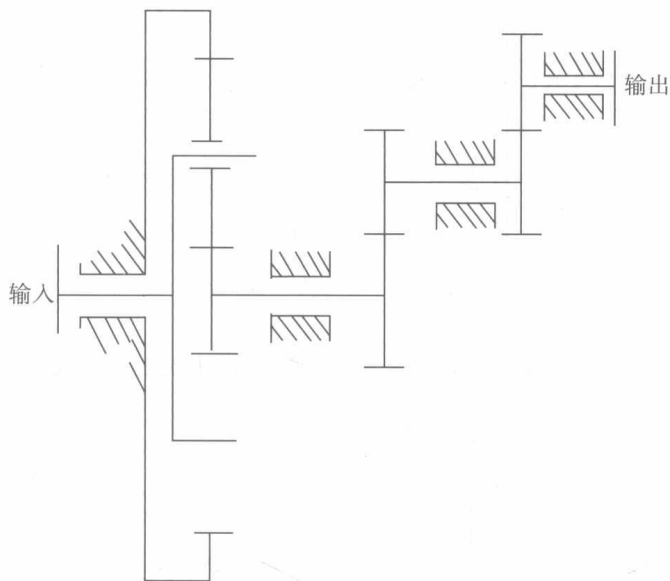


图 1-1 单级行星轮系与二级平行轴结构的行星齿轮增速传动机构简图

该行星轮系增速传动机构是由一级行星轮系与二级平行轴齿轮传动构成,其中单级行星轮系的行星架作为输入构件,行星齿轮作为输出构件并与第二级平行轴传动的输入轴相连接,行星轮系的内齿圈作为固定构件,该机构可以实现增速的功能。

两级行星轮系与一级平行轴机构的增速传动简图,如图 1-2 所示。

该行星轮系增速传动机构是由两级行星轮系串联而成的,其中第一级行星轮系的行星架作为输入构件,第一级行星轮系的内齿圈固定,第一级行星轮系的太阳轮作为输出构件,与第二级行星轮系的输入构件相连接;第二级行星轮系的行星架作为输入构件,与第一级行星轮系的输出构件相连接,第二级行星轮系的内齿圈固定,第二级行星轮系的太阳轮作为输出构件,最后经过平行轴传动输出,该两级行星轮系的传动机构可以实现增速的功能。

复合行星轮系与一级平行轴增速传动机构,如图 1-3 所示。

该复合行星轮系增速传动机构是由差动行星轮系和星型轮系组合而



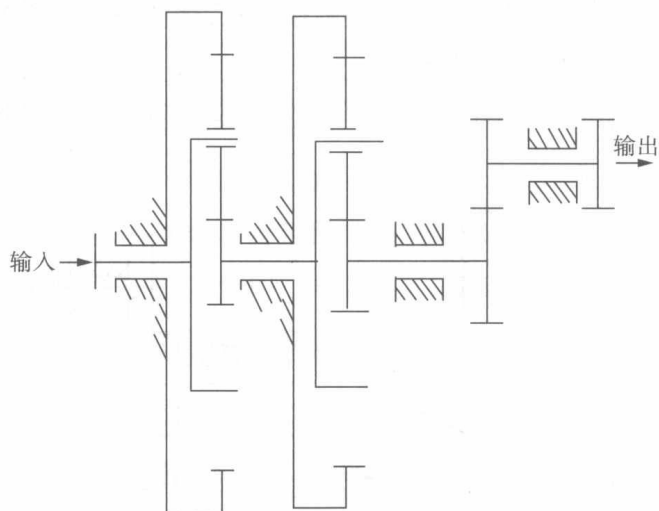


图 1-2 两级行星轮系与一级平行轴机构增速传动简图

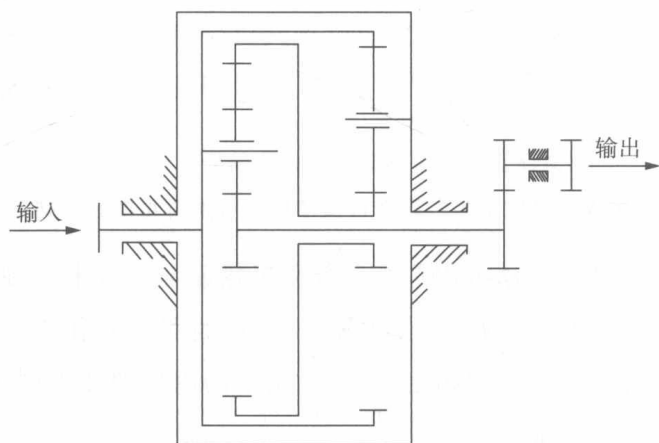


图 1-3 复合行星轮系与一级平行轴增速传动简图

成,其中差动轮系的行星架和内齿圈作为输入构件,其中差动轮系的行星架与星型轮系的内齿圈相连接,差动轮系的太阳轮作为系统的输出构件;星型轮系的内齿圈作为输入构件,星型轮系的行星架固定,星型轮系的太阳轮输出,最后经过平行轴传动输出实现增速功能。

上述的行星齿轮增速传动机构尽管在实际工作中获得了应用,但也各有缺点。单级行星轮系与二级平行轴结构的行星齿轮增速传动机构,承受的负载较大,易发生故障;两级行星轮系与一级平行轴结构的增速传动机构