序言　工程机械传动装置及其发展趋势　　-张展

工程机械是集机、电、液一体化和信息、激光等高新技术以及审美艺术于一身的现代机电产品，正在向着自动化、远距离控制和智能化等方向发展。现代工程机械产品的技术水平在一定程度上象征着一个国家的工业水平。近 20 多年来，我国工程机械产品得到了很大的发展，然而，到目前为止，现代工程机械产品的核心技术仍为发达国家所垄断，发达国家的产品技术仍然代表着相应的技术发展方向。

我国仍有不少工程机械产品要从国外进口，为此应大力发展工程机械，其是用于完成土木工程和建筑工程任务的机械设备，应用量大面广。

工程机械应用领域

a）土方机械；

b）石方机械；

c）道路建设；

d）桥梁工程；

e）隧道工程；

f）建筑工程；

g）农业与水利工程；

h）港口及河岸防护工程；

i）采矿业；

j）林业工程；

k）环境工程；

l）桩基工程。

一、我国齿轮及减速器现状

我国是齿轮生产大国，但不是强国，全国生产齿轮企业有 1000 多家，骨干企业 300 多家。截止 2013 年，生产总值达 2080 亿 RMB，见图 1 我国齿轮发展现状及图 2 我国的科技服务平台。

最大模数 m_{max}=135mm,用于海洋钻井平台，已通过中国船级社（CCS）和美国验收船级社（ABS）。三峡升船机齿条 m_{max}=62.667mm。最大线速度 V=168m/s,最大功率 P_{max}=44000KW，最高转速 η_{max}=67000r/min,精度达 4-6 级。

风电已达 6MW=6000KW。包含 170%的超载试验和 135%超速试验。传动方式以一级行星+两级圆柱齿轮传动居多。增速箱通常以定星式居多，以减少行星轮的离心惯性力的影响。

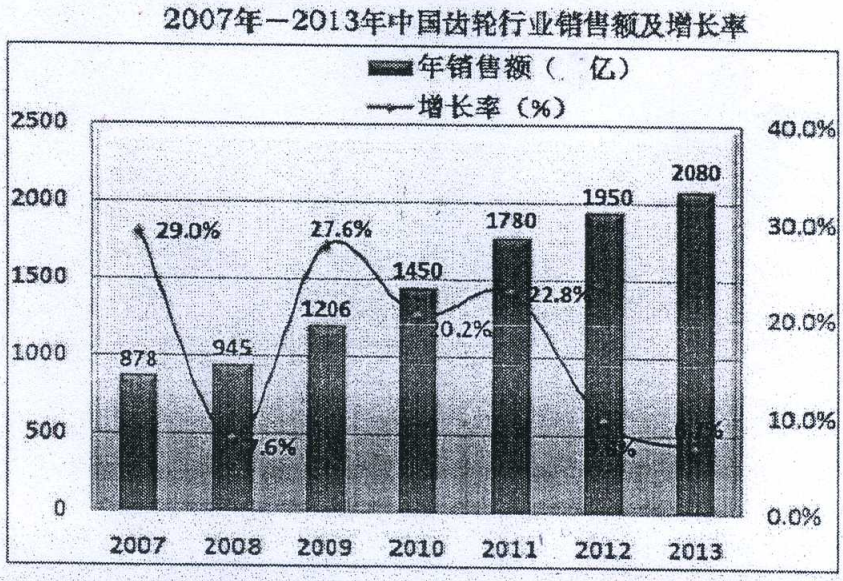
在汽车行业中，我国每万名工人拥有机器人约 150 台，而日本为 1710 台，意大利为 1600 台，德国为 1180 台，法国为 1120 台，西班牙 950 台，英国 610 台，瑞典 630 台。

为此应大力发展机器人，与此同时应大力发展谐波齿轮传动及 RV 减速器。轨道交通要求齿轮具有高韧性、高强度、高精度加工的齿轮，目前大多依赖进口。熔体泵、纺丝机仍系进口。

工程机械是使用量大面广的机械。如挖掘机、推土机、铲运机、工程起重机、打桩机、盾构掘进机、硬岩隧洞掘进机等。全球市场每年总额约 1800 亿美金，中国仅占 15%，出口额只占 0.5%，价格仅为人家的 60%，有很大的发展空间。

其传动装置除采用通用减速器 H 系列、B 系列、P 系列行星减速器外，大量是动力换挡变速器，受国外垄断企业的制约。为此，应大力开发与研制创新型的、有中国特色品牌的动力换挡变速器，以满足国民经济的发展需要。

1.齿轮产品销售额及增长率



我国规模以上齿轮制造企业1000多家，骨干齿轮企业300多家，重点企业的产量、销售额占全行业的75%以上。

2.主要创新及服务平台

◆ 近年来创建的齿轮创新与服务平台

序号	名称	依托单位	批准（共属）单位
1	机械传动国家重点实验室	重庆大学	国家计委
2	国家齿轮产品质量监督检验中心	郑州机械研究所	国家质量技术监督局
3	全国齿轮标准化技术委员会	郑州机械研究所	国家标准化管理委员会
4	齿轮行业生产力促进中心	郑州机械研究所	科技部
5	工业（齿轮）产品质量控制和技术评价实验室	郑州机械研究所	工信部
6	机械工业齿轮传动工程研究中心	郑州机械研究所	中国机械工业联合会
7	机械工业齿轮传动工程实验室	郑州机械研究所	中国机械工业联合会
8	中国机械工程学会机械传动分会	郑州机械研究所	中国机械工程学会
9	全国减速机标准化技术委员会	江苏泰隆减速机股份有限公司	国家标准化管理委员会
10	高效高精度齿轮机床产品技术创新平台	秦川机械发展股份有限公司	科技部
11	国家齿轮传动技术动员中心	杭州前进齿轮箱集团股份	国家经动办
12	中国汽车工程学会齿轮技术分会	天津天海同步器有限公司	中国汽车工程学会
13	机械工业小模数齿轮传动工程技术研究中心	常州德劢精密传动有限公司	中国机械工业联合会
14	机械工业汽车齿轮工程技术研究中心	浙江双环传动机械股份有限公司	中国机械工业联合会
15	机械工业中小功率减速机工程技术研究中心	浙江杰牌控股集团有限公司	中国机械工业联合会
16	机械工业数字化齿轮测量系统工程实验室	哈尔滨量具刃具有限责任公司	中国机械工业联合会
17	机械工业重载齿轮传动工程研究中心	南京高精传动设备有限公司	中国机械工业联合会
18	机械工业风电齿轮传动系统工程实验室	南京高精传动设备制造有限公司	中国机械工业联合会

二 目前存在的问题及不足之处

1 基础研究和基础数据较少

缺乏对齿轮材料的疲劳极限应力、金相组织图谱等相关的基础试验研究，缺乏新齿形研究、载荷谱测试、加工工艺研究等基础研究，使得产品设计和制造缺少数据支撑，造成我国高端齿轮产品的设计制造能力明显不足，高端产品被国外长期垄断。另外，专业软件开发和应用滞后，多学科综合设计技术和手段落后。

2 缺乏技术创新和试验测试服务平台

一是缺乏面向全行业的齿轮共性技术和前沿技术研究开发、重要科技成果转化及工程化应用研究的创新平台；二是缺乏为行业提供产品性能试验测试的服务平台，缺乏指导齿轮及其传动装置设计、制造改进和可靠性提升的测试评价服务体系

3 齿轮热处理工艺水平不高

渗碳淬火变形大；感应淬火易出现齿根开裂；渗碳效率低、层深浅，虽然稀土催渗取得了很好的效果，但仍具有较大局限性；缺乏有效的工艺过程控制方法。

4 加工检测装备和刀具差距较大

硬质合金刀具与发达国家差距大，高效滚齿刀具、干切削刀具、高级CBN刀具及磨齿用高档砂轮几乎全部进口；高效制齿机床、高档数控成形磨齿机等仍基本依赖进口；大型和小型齿轮量仪以及在位快速测量机仍是空白。

5 产品生产效率低，质量稳定性欠佳

尽管我国进口了不少高档齿轮制造装备，但由于刀具和装备使用、制造工艺参数选择、生产管理等方面的差距，造成产品的质量稳定性差，生产效率低，能耗高。

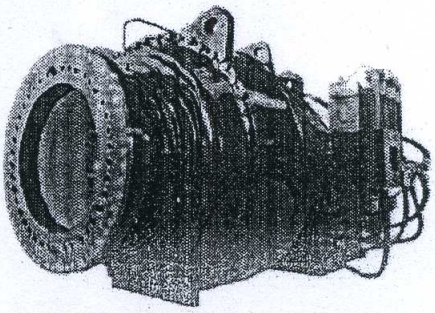
总之，存在技术水平的差距和生产规模的差距。技术方面差距，如承载能力方面的差距，基础元件的差距，如轴承寿命、轴承的可靠度，传动装置的使用可靠性尚存在一定差距，有待进一步努力。

三今后的发展与方向：
1 大力发展风电技术
六高：高承载能力、高齿面硬度、高精度、高速度、高传动效率和高可靠性
二低：低成本、低噪声
二化：标准化、系列化（模块化）。

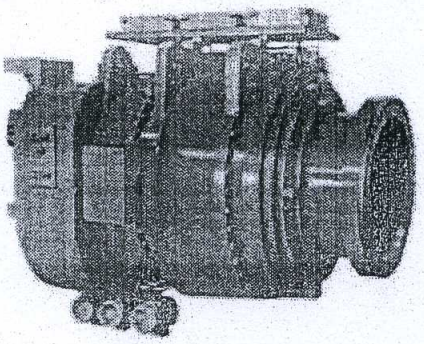
3 风电齿轮箱制造技术

$P_{max}=6MW=6000KW$

南高齿研制的的6MW风电齿轮箱通过了严格的型式试验验证，包含170%的超载试验和135%的超速试验，压力、温度、振动等指标均满足标准要求。



南高齿FD6600C型6MW风电齿轮箱



FD5500Z型5MW风电齿轮箱

4 风电齿轮箱制造技术

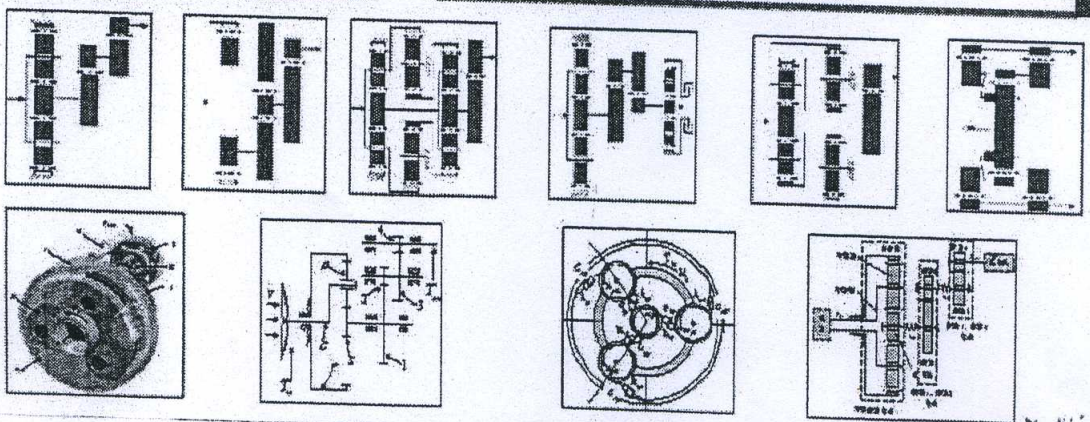
大型风电齿轮箱
研制创新点：

专利：ZL200910096836.5
ZL200710191373.1
ZL200920037414.6
等7项；
论文：ASME、JSME及机械工程学报等论文13篇。

提出了模块多级多行星功率分流与均载的风电齿轮箱传动方案；

建立传动子系统与结构子系统的耦合动力学模型，研究了系统振动分岔特征及参数变化对系统响应的影响规律，揭示了齿轮传动系统非线性振动特性。

对提高功率密度、传动平稳性至关重要！



2大力发展机器人，以适应工业的需求

5.齿轮下游产业情况 → **机器人** 应大力发展

国家已将机器人产业作为战略性新型产业

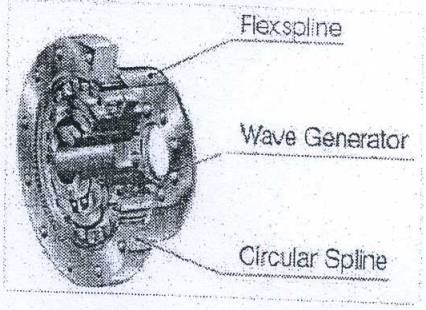
“十二五”期间将是中国工业机器人产业发展的关键转折点，我国工业机器人的市场需求量将会形成井喷式的发展。

汽车工业中，我国每万名工人拥有机器人约150台，而这一数据在日本和意大利分别达到1710和1600，德国为1180，法国1120台，西班牙950台，美国770台，英国610台，瑞典630台。

6.精密机器人减速器制造技术：大力发展机器人的关键 谐波减速器

→ **谐波减速器**

谐波减速器本身固有的特点，使其在传递载荷时产生较大的弹性变形和回差，影响了机器人末端执行器的定位精度和动态特性。



→ **RV减速器**

特点：

①体积小，质量小，承载能力强；

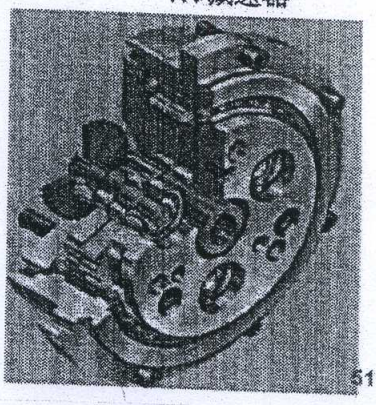
②传动平稳、噪音低；

③传动比范围大，i=31~171；其传动效率高85%~92%；

④较高的传动精度与较小的回差；

⑤扭转刚度大，抗冲击性能强。

RV减速器

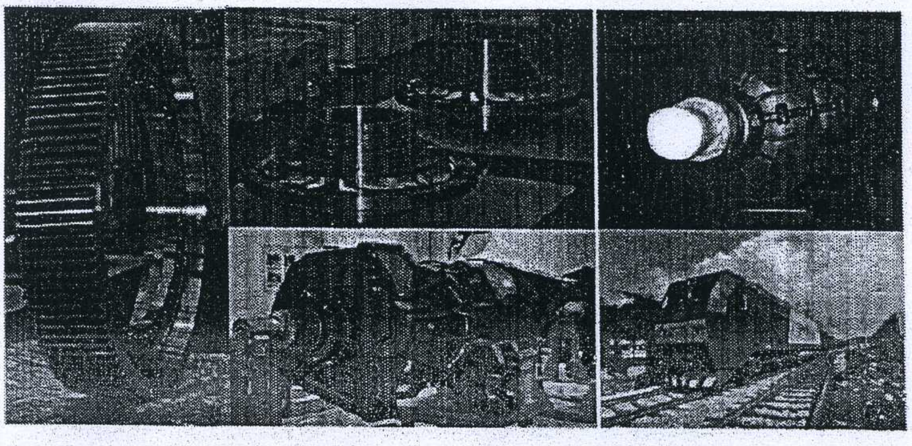


51

3 轨道交通驱动技术

7. 轨道交通驱动单元制造技术

要求：高韧性、高强度、高精密齿轮传动，目前仍依赖进口



高速机车、轻轨客车及地铁机车齿轮驱动单元的特点：

①安装空间小、环境恶劣、结构紧凑；

②负荷大、速度高、精度高；

③大功率、高速、重载；

④轻量化、可靠性要求高。

牵引齿轮必须韧性好、强度高、有良好的动态啮合性能、有良好的润滑状态和热传导等。目前轨道交通、高速机车、轻轨客车及地铁机车齿轮驱动单元大部分仍依赖进口。

60

8. 齿轮下游产业情况 → 高铁、轨道交通

城市轨道交通

国家下放轨道交通项目审批权　地方密集批复城轨项目

重庆市轨道环线工程将在2018年建成试运行，该项目投资估算总额为314.18亿元。

兰州市城市轨道交通1号线一期工程可研报告批复总投资189.43亿元。

国家发改委官员日前表示，到2015年我国轨道交通运营里程将达3000多公里，到2020年达到6000公里，所需投资额在3万亿以上。

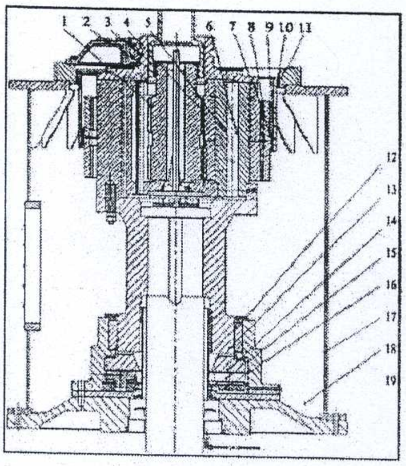
4　核电齿轮箱与直升机上应用的面齿轮传动

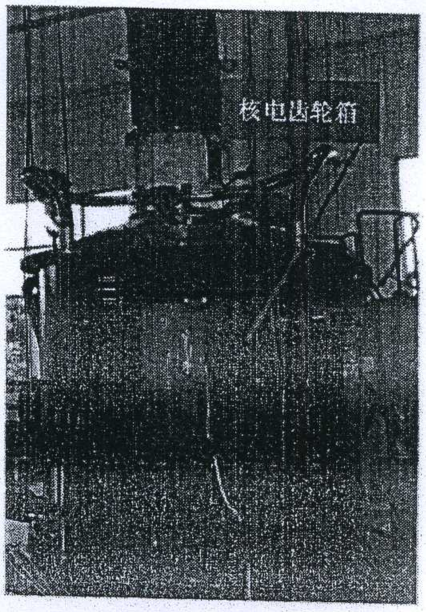
⑨.核电齿轮箱制造技术

秦隆生产的水泵用齿轮箱、单级行星传动

$P = 5700 KW$

$T_2 = 280 KN \cdot m$　已通过鉴定、验收





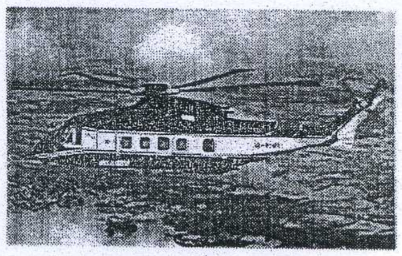
⑩面齿轮传动

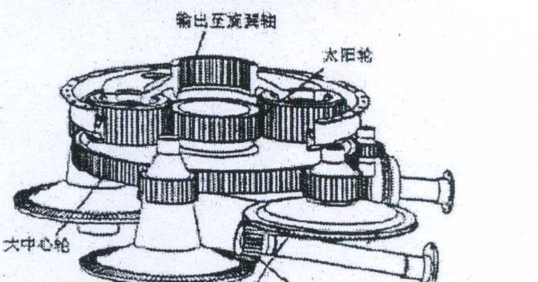
在直升机上的应用

在直升机传动系统中采用面齿轮的动力分流装置，比传统装置的重量下降了 40%，且振动小、噪声低，具有很多优点。

优点：

1）　小齿轮是直齿圆柱齿轮，无轴向作用力，可以简化支撑，这对于航空工业中空间受限和要求轻量化的场合非常有利。
2）　具有较好的互换性。
3）　单级传动比大。





面齿轮的动力分流的直升机传动装置

33

此图源于 Litvin.F.L. Gear Geometry and Applied Theory [M]、2nd.ed Cambridge, Cambridge University press. 2004.

张展主编 实用机械传动装置设计手册 上有此图，係张展译过来的。

面齿轮传动是一种圆柱齿轮与圆锥齿轮相啮合的齿轮传动。其中小齿轮为圆柱齿轮（齿数为偶数），大齿轮（即锥齿轮）为面齿轮 $\delta=90^\circ$，轴交角 $\Sigma=90^\circ$

5 国内最大模数 $m_{max}=135$ mm

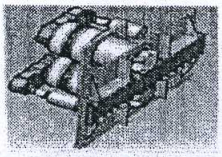
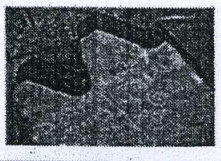
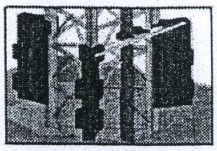
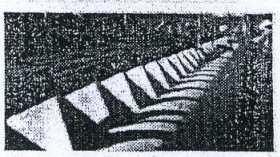
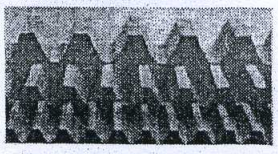
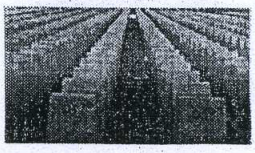
模数 $m_{max}=135$mm

11.大模数齿轮齿条 → 海洋钻井平台齿轮、齿条

郑州机械研究所研制的大模数齿轮齿条最大模数达135mm，产品已通过中国船级社（CCS）和美国船级社（ABS）验收。

专利：ZL200910227466.4、ZL200820070565.7、ZL200920296929.8等3项

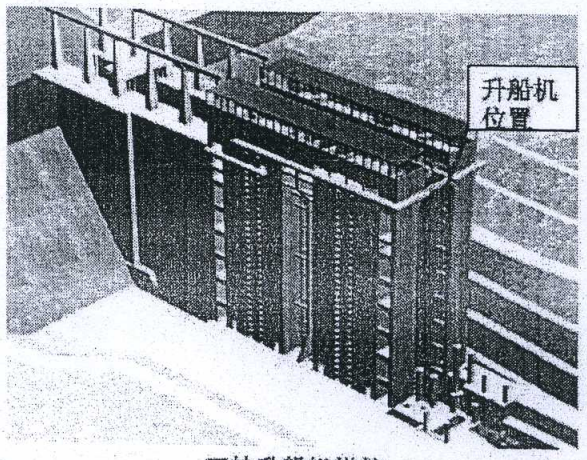
开发了大厚度特大模数齿条的精密火焰切割成套工艺技术及数控火焰切割机，首用数控火焰切割精密成形法研制钻井平台桩腿齿条，可直接使用。

海洋钻井平台齿轮、齿条

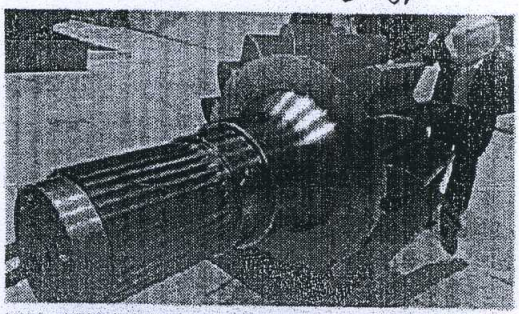
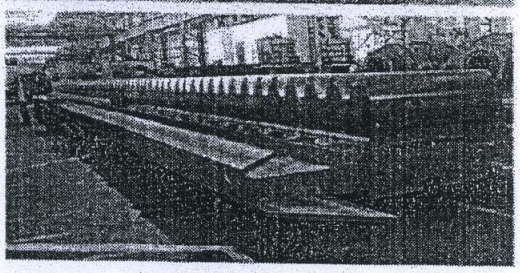
12.大模数齿轮齿条制造技术 → 三峡升船机齿条

$m_{max}=62.667$
$b=810$



三峡升船机塔柱

三峡升船机是世界上最大的垂直升船机，采用齿轮齿条爬升式，提升高度达113米，能通航3000吨级船舶。齿条每件长：4705mm，模数：62.667mm，齿宽：810mm，单件重10t，承受切向载荷高达100t.

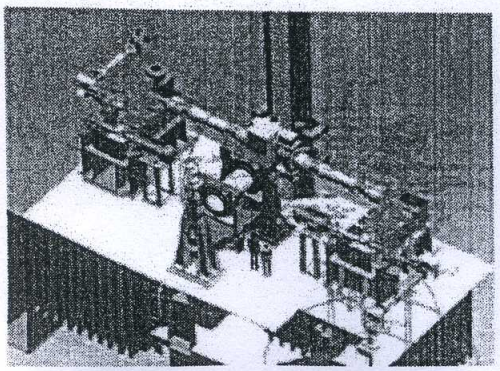
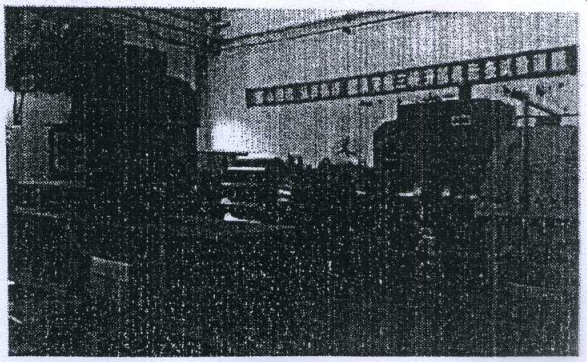



三峡升船机齿轮、齿条

13.大模数齿轮齿条 → 三峡升船机齿条

三峡升船机齿条试验

郑州机械研究所承担国家04重大专项项目

6 ADI材料的应用

14.等温淬火球墨铸铁（ADI）齿轮

特点：日本、美国发展很快 $E=2.1\times10^5$MPa(钢) $E=1.7\times10^5$MPa(球铁)

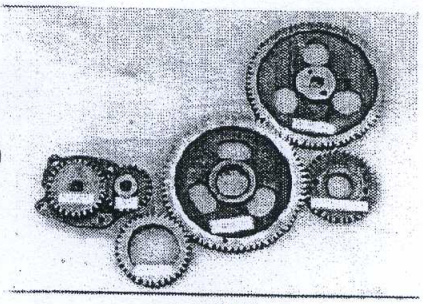
（a）与钢相比有较低的弹性模量，相同负载下，能保证有较大的接触表面，降低了接触应力。

（b）较低的摩擦、良好的磨合性和高的抗擦伤性

（c）有很高的抗磨料磨损和冲击磨损的性能

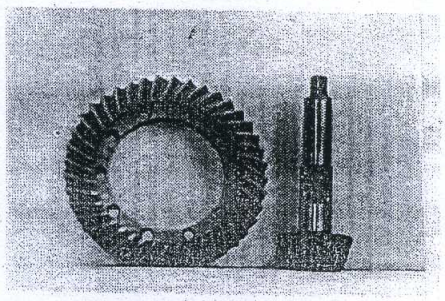
（d）材料具有很高的减振能力。

（e）ADI的密度比钢轻10%左右。



ADI齿轮

苏州有美国独资的.



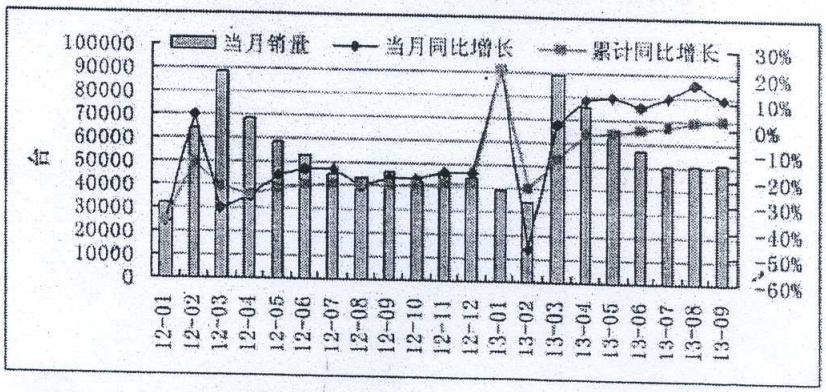
ADI精铸螺旋伞齿轮

48

15.齿轮下游产业情况 → 工程机械

2012年的普遍下滑；2013年工程机械市场主要产品销量同比涨跌互现。2013年全行业挖掘机同比下滑3.1%;装载机同比增长4.3%；推土机同比下滑7.0%；压路机同比增长17.8%；叉车同比增长12.8%。随着经济稳步回升，和基础设施建设的好转，2014年工程机械行业将有所回暖，预测2014行业销售保持平稳增长，增幅8%左右。

2012年以来八大工程机械总销量及同比增长



数据来源：工程机械工业协会，中经网整理

"新型城镇化"提振

城市基建或引数万亿投资

9

自动变速器（Automated Transmission）主要以下四种类型

1）自动化的手动变速器（AMT-Automated Manual Transmission）

2）液力变矩自动变速器（AT-Automated Transmission）

3）双离合器自动变速器（DCT-Dual clutch Transmission）

4）无级变速自动变速器（CVT-continously Variable Transmisson）

9

7. 我国应大力发展工程机械及其传动装置

全球工程机械市场约有 1800 亿美元，我国占有 15%的份额，出口额仅占 0.5%，价格仅为国外的 60%，有很大的发展空间。

我国应大力发展，高原型工程机械、特殊工程机械、农用工程机械、通用或专用工程机械、出口工程机械。

其中传动装置仍是瓶颈，有些国外垄断企业，仍卡着我们脖子，我们大力开发，设计研制自主创新的产品，走向世界。

8. 传动装置除动力变速箱以外，还有 P 系列、H/B 系列减速器等

1）轮边减速器

2）回转减速器

3）卷扬传动装置

希望有新结构，有自主品牌，中国特色的产品走向世界。

9 中国工程机械行业发展规划

中国工程机械行业“十二五”规划

(1) “十二五”发展规划目标

科技发展目标：

重点围绕低碳、绿色、高效、节能、信息化工程全面展开各项技术的深入研究，要在以下八个领域有所突破：

1) 推动行业科技战略联盟的组建；
2) 推广技术创新方法的学习和应用；
3) 加强产品可靠性的共性技术研究；
4) 通过轻量化设计技术、可靠性与安全性评价技术的应用研究，争取在《十二五》期间完成10种以上产品的轻量化设计，并形成示范应用；
5) 开展工程机械再制造技术研究；
6) 加快产品智能化、数字化、可视化以及远程故障诊断和通讯技术的升级；
7) 开展工程机械产品节能技术研究和工程机械产品能源多样性技术研究；
8) 加强工程机械产品人机工程学研究，实现操作空间的研究。

英文：human engineering 人机工程学（清华大学，英汉技术词典 P997 下3
日文：人间工学（人机工程学） 译成（企业）人事管理（下关）

中国工程机械行业“十二五”规划

(2) “十二五”发展规划目标

质量、效益目标：

对发动机、液压系统、传动部件、光电子信息系统等各环节进行可靠性研究。使主要产品平均无故障间隔时间(MTBF)由400小时提高到600小时

流动资金周转率行业平均达到2次/年以上，先进企业达到3次/年以上

全员劳动生产率达到30万元/人·年以上

通过科技创新，工业增加值由21%提高到25%以上

行业平均年利润率指标保持在7%以上

注：FEM（Finite Element Method）有限元法

FEM=欧洲机械搬运学会 F=Fletting M=Mechnical E=European