

齿轮技术的创新和发展趋势

梁桂明

(洛阳工学院, 洛阳 471039)

[摘要] 最早的齿轮是怎样发明出来的? 它源于何方? 用于何处? ——这是近百年来人们在探索的一个谜。两千年前, 在中国、印度、希腊、罗马、埃及出土和出水的铸铁齿轮与青铜齿轮似乎解开了这个谜。其实不然, 它们只是第2代齿轮。第1代齿轮是木制齿轮。它源于四千年前, 各文明古国发明水力机械中伴生。这是由于这些文明古国聚居大河与海湾, 与水有“缘分”所致。第2代齿轮的辉煌点表现在公元前200年中国的发明——指南车上。它在世界上第一次发明了差动机构, 第一次实现半自动控制机构, 第一次出现有走向功能的机器人。1800年工业革命带来了第3代齿轮, 其特征是用直刃刀具成批生产渐开线的钢制齿轮形成了现代齿轮的技术平台。进入21世纪, 以高强度复合材料代替资源匮乏的钢材, 标志着新一代(第4代)齿轮的到来, 它将与知识经济共存。未来50年齿轮创新的趋势, 是追求小化、净化、静化, 高可靠性、高强度、高转速和低材料耗、低能耗、低重量。

[关键词] 齿轮; 创新; 发展趋势

1 第1代齿轮发明寻源

1.1 考古寻源

这是近百年来人们在探索的一个难解之谜。按常规的“考古”线索, 应从“考古”着手, 从出土文物中找答案。由于先后从古希腊、罗马、埃及、印度和中国都有出土的青铜齿轮或铸铁齿轮出现^[1], 如图1, 于是有齿轮源于欧洲的“欧源”说, 和类似的“非源”说与“亚源”说, 各自找到物证来支持。莫衷一是。

1.2 考古求同

如果我们用求同存异的思维来看, 有三个共同特点:

- a. 都在同一时代——大约两千年前;
- b. 都在亚、欧、非的文明古国出现;
- c. 都是用青铜或铸铁材料制成。

这三点, 与当时的历史背景——奴隶社会后期先后发明的青铜和铸铁冶炼技术的生产力相适应。但从生产力的发展来看, 人类在采用青铜、铸铁之

前, 早就会使用石和木、竹做工具和器械。可见, 用青铜、铸铁做的齿轮是“第2代齿轮”, “第1代齿轮”应是木制为主的齿轮。

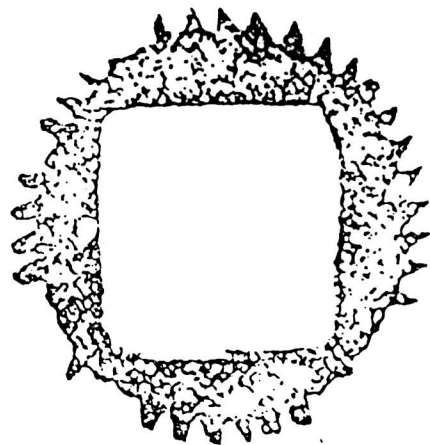


图1 山西永济出土的青铜齿轮

Fig.1 The unearthed gear from Shanxi in China, made of bronze

由于木制齿轮埋在地下或泡在水中两千年，早已腐烂或变成炭，所以不可能找到第一代出土、出水的木制齿轮。“挖文物以求证”的线索失效，只有另找线索，作间接证明。

新的线索是“技术进步的继承性”——包括上溯和下延。上溯是指从第2代齿轮的发源地，即文明古国中上溯第1代齿轮发明的背景；下延是在第2代齿轮之后找寻第1代遗留下来的踪迹。

1.3 上溯——第1代齿轮发明的背景——自然环境及其变迁

1.3.1 自然环境及其变迁 远古人类的生产力低下，抗自然灾害的能力很低。那时文明的兴衰，在很大程度上被自然界环境的变化所左右。因此，探索远古文明，可以由另一条思路——自然界环境及其变迁去探索。

据勘探和记载，地球大气温湿起来，意味着产生绿洲，人类文明就兴盛；地球冷干，意味着荒凉和沙漠，人类文明就衰落。

五千年前，大气由温湿转向干燥，人类更加密集地聚居在大河流域和海湾地带。世界五大文明古国也于那时形成：

黄河——中国；恒河——印度；地中海——希腊、罗马；尼罗河——埃及。

1.3.2 水力的开发和利用 人类对动力来源的开发和利用，也是一个发展过程，它也反映了人类文明的进步。远古时代，由于技术落后，只好利用自然力——水力和风力作为动力，而蒸汽机、电力和原子能……都是后来文明进步的产物。

聚居在大河流域和海湾地带的各文明古国的人们，自然想到要利用水力——于是发明了水车。用水车来脱壳、磨粉。各文明古国几乎在同时代各自独立地发明了水车。这是由于在相似地理与文化条件下，各自涌现出能工巧匠们的必然产物。这与上述第2代齿轮出现的多源说一致。利用水作动力来工作，是技术进步的一大发明。利用水流的位能，造成立式水车。但磨盘不能立放，磨盘是垂直轴，水轮是水平轴，两者怎样联系传动？于是传递轴承线垂直或斜交的两轴间的运动和动力的齿轮副出现，其示意图见图2，这是锥齿轮的“祖先”。人类就是在造水车的过程中，发明了齿轮。至少，这是人类第1代齿轮发明中的一种发明实例。这种发明实例在同一时代生产力的远古文明古国中，同时期出现。

1.4 下延——找寻第2代齿轮在现代遗留的踪迹

1.4.1 传物 后代人仍沿袭第1代水车磨的基型继续制造木制水车磨，在偏僻乡村的河边，至今仍能看到这种水车为人们工作着。在深圳“锦绣中华”和“民俗文化村”的门前，立下这种水车磨模型。它展示了聪明的劳动人民利用水力创造第1代锥齿轮传动的水车磨为人类造福的伟绩，见图2。

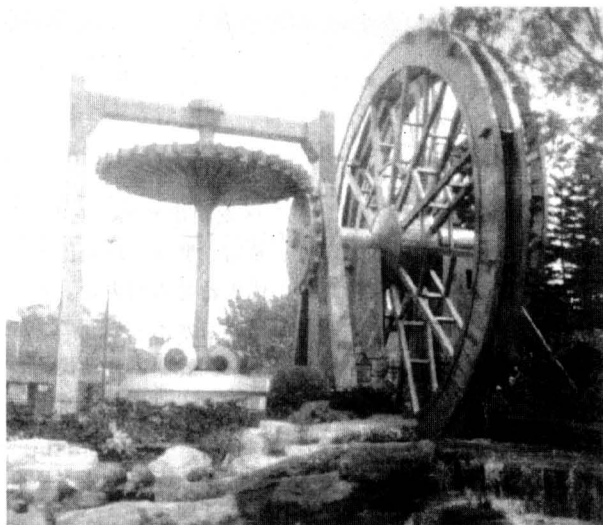


图2 水车磨模型

Fig.2 The model of water-mill for grinding grain

1.4.2 传文 各文明古国都有古代创造水车的记载。

中国记载：西晋初年王祯写的《农书》记有杜预发明的“水车连磨”。一水车可带2~9个磨，一昼夜可灌田数亩。可见，在公元250年，中国水车磨不但已发展到大型、连动、高效阶段，而且发明了水车磨与汲水车综合两用的新技术。

2 第2代齿轮——上下两千年

从公元前200年到公元1800年，随着人类生产力的发展和冶炼技术的开发，用铜和铸铁制造的耐用性好得多、承载能力大得多的齿轮，成为第2代齿轮，逐渐取代木制的第1代齿轮。

2.1 第2代锥齿轮的主要特点

a. 齿轮材料 青铜与铸铁，由于矿源关系，后一千多年用铸铁齿轮；

b. 动力来源 水力、畜力、风力，以水力为主；

c. 齿轮形状和传动品质 齿廓有圆弧形、尖角形、梯形；半拨动半啮合状态的垂直轴传动，其

传动效率、耐用性比第1代齿轮优越得多；

d. 用途 谷物加工、水利排灌、交通运输。

2.2 第2代锥齿轮之花——指南车

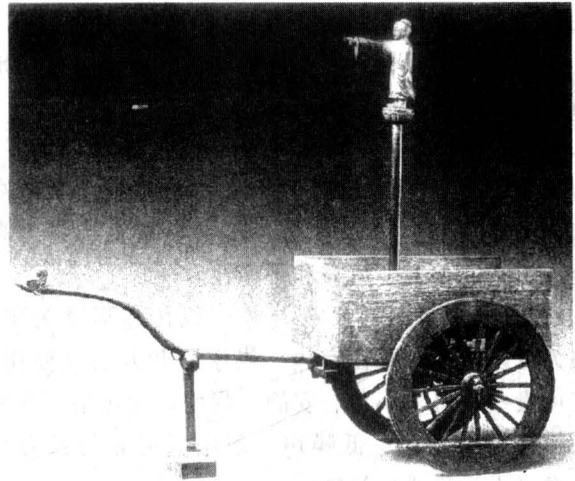
指南车（图3）是中国人的独特发明，其齿轮传动构思之妙、水平之高、涉及领域之广，堪称古代文明之最，是第2代齿轮的骄傲，至今令国外人士叹为观止。IFTOMM 齿轮委员会主席、著名齿轮专家达德雷（Dudley）誉之为“古代齿轮技术的里程碑”。最早见于史书记载的是中国晋朝葛洪写的《西京杂记》中记载有西汉皇帝出行时，其仪仗队有古代指南车和记里鼓车，时间是公元前200年至公元23年，后来失传。魏明帝时期（约公元235年），杰出的机械发明家马钧复制出古代指南车。这种“复制”是在无实物和具体参考资料的情况下，凭“直觉”和“想像”创造出来的。因此，也可以说，马钧发明了“后一代”的指南车，到晋朝解飞和魏猛作了改进，把左右离合改为升降离合。如图3中的机构图所示，车中心立轴上端固连一木人，其手指南方；下端固连一中心齿轮，此齿轮被带有离合器功能的差动—行星机构所带动，差动机构装在车的底盘上，其输入轴齿轮与左右车辘上的齿轮保留升降位置（升离降合）。当指南车向正南方行驶时，车辘齿轮与差动机构分离，木人不动（指南方）；当车向东（左）拐弯时，左车辘齿轮与差动机构啮合（接受传动）带动木人下端的中心轮等速反向回转，使木人仍保持指向南方；当车向西（右）拐弯时，右车辘与差动机构啮合，带动木人反向等速回转，保持木人指向南方。中国机械史专家王振铎教授经多年研究，制出指南车模型，现陈列在北京中国历史博物馆中，这绝妙的指南车齿轮机构表明了：

- a. 中国首次创造了复杂的锥齿轮差动—行星机构，这是世界上最早的行星机构；
- b. 中国首次创造了自动控制机构；西方学者对此发明给予高度评价，称它是“一切自动控制机构的先驱”；
- c. 中国首次创造运用自动补偿原理造出了带定向功能的机器，这是世界上最早的拟人动作机器。

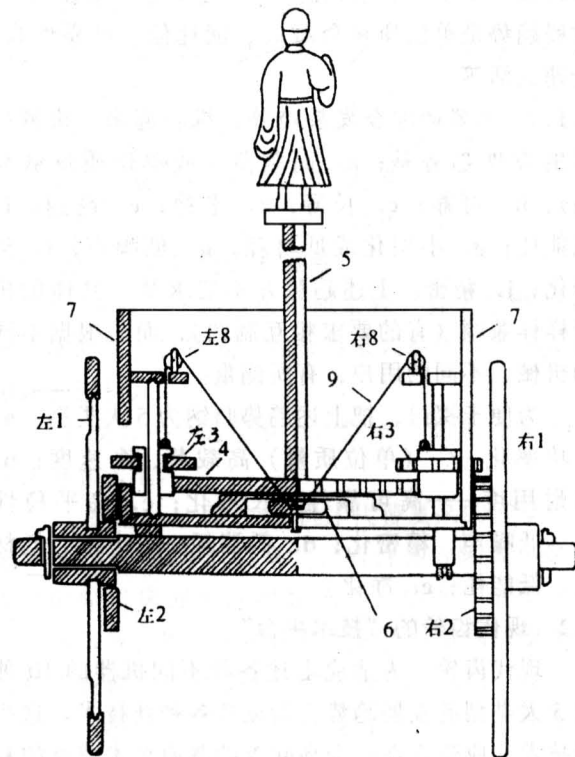
3 现代齿轮——第3代锥齿轮——辉煌200多年

第3代齿轮，起于公元1800年，瓦特发明蒸汽机，引起了工业革命之后，一直到今天这短暂的

200年中，以蒸汽机起动，继而以内燃机、电动机为新动力代替水力传动的第3代钢制齿轮。美国、前苏联、德国、日本国等经济发达国家带头把齿轮推向第二个辉煌高峰。其科学技术发展之快、成果之多，远远超过两千年前的第2代齿轮时期。



外观图



机构图

图3 指南车

Fig.3 South pointing chariot

- 1. 足轮 2. 立轮 3. 小平轮 4. 中心大平轮
- 5. 贯心立轴 6. 车辘 7. 车厢 8. 滑轮 9. 拉索

3.1 现代齿轮的发展趋势^[2]

现代齿轮, 要依靠其载体——现代机器去发挥作用, 因此现代齿轮技术的发展, 必须适应机器的发展趋势。

机器可分为以传递动力为主和以传递运动为主的两类, 有固定安装的、可搬运的和行走的3种。

不同类的机器, 有不同的功能和要求, 相应地有不尽相同的发展趋势。

3.1.1 机械设备的的发展趋势 以传递动力为主, 因固定在厂房或矿区里, 体积大些, 噪声高点, 消耗多点, 可以容忍。其主要发展趋势为高速、重载、长寿、可靠和平稳性。

3.1.2 家室用品的发展趋势 以传递运动为主, 因为可以搬运, 放在室内, 供家庭和办公室使用, 宁可贵些, 追求小巧、安静、耐用、无污染。其发展趋势是小型化、低噪声、耐用(可靠与长寿)、洁净(无污染或少污染)。

3.1.3 行走器的发展趋势 既要传递动力又要改变速度, 要求“轻装前进”, 不能半途“抛锚”。其发展趋势是单位质量负载高、能耗低、可靠性高、变速灵活等。

3.1.4 机器的综合发展趋势 综合起来, 机械技术的发展趋势是: **a.** 高载荷(或单位质量载荷高); **b.** 可靠; **c.** 长寿; **d.** 平稳; **e.** 高速; **f.** 低能耗; **g.** 小型化或低材料; **h.** 低噪声; **i.** 洁净化; **j.** 精密。上述趋势并不要求某一具体的机器样样兼顾(有的要求相互制约), 而是根据不同的机械、不同的用户, 有所侧重。

为便于探讨, 把上述趋势归纳为5大类型: **a.** 大功率化——(单位质量)高载荷、高速度; **b.** 高耐用度——高可靠性、长寿化; **c.** 高平稳性——低噪声、精密化; **d.** 低消耗——小型、低材料、低能耗; **e.** 净化。

3.2 现代齿轮的“技术平台”

现代齿轮, 为适应上述各种不同机器的10种或5大类型的发展趋势, 需创造各种新技术。这些新技术, 应建立在一个高起点的普遍技术成就的基础上, 我们不妨称之为: “现代齿轮技术平台”。在这平台上, 演出各式各样的创新技术的精彩节目来。

3.2.1 采用渐开线齿廓 渐开线齿廓的齿轮传动是迄今为止最有生命力的齿廓传动。理论上, 凡符合啮合定律的任何曲线, 都可作为齿轮啮合的齿

廓, 但实践上, 用于工业生产的齿廓曲线, 只有摆线、圆弧线、渐开线及其组合齿廓4种。渐开线齿廓的优点是:

a. 可用直刃刀盘切齿, 而直刃易制造、易刃磨、易测量, 生产成本最低;

b. 齿轮安装距有变动, 仍可啮合, 对装置不敏感;

c. 可采用变位设计, 是获得优质传动的最经济、最实惠的设计。

以上优点是其他齿廓所无法达到的。

3.2.2 采用变位齿轮设计 采用非零传动是渐开线齿廓变位设计的最佳选择。

由表1可知, 就综合强度看, 正传动优于其他传动; 就平稳性看, 负传动优于其他传动; 就齿轮体积看, 正传动体积最小。总的评价是, 如果变位系数选择得当, 变位传动优于非变位传动; 在变位传动中, 非零传动优于零传动。

表1 变位齿轮的类型和综合特征

Table 1 The type and characteristics of modification of gears

| 传动类型 | 非变位齿轮 | | 变位齿轮 | | |
|------|-------|----------------------|---------------------|------------------|------------------|
| | 标准传动 | 零传动 | 正传动 | 负传动 | |
| 几何特征 | 中心距 | $a = mZ_{\min}$ | - | ↑ | ↓ |
| | 分度圆 | $d = mZ$ | - | - | - |
| | 节圆 | $d' = d$ | - | ↑ | ↓ |
| 强度 | 啮合角 | $\alpha' = \alpha$ | - | ↑ | ↓ |
| | 齿厚 | $S = p/2$ | ↑ ($x > 0$) | - | ↓ ($x < 0$) |
| | 滑动系数 | η | ↓ | ↓ | ↑ |
| | 综合强度 | | ↑ | ↑↑ | ↑ |
| 平稳性 | 齿面重合度 | $1.5 < \epsilon < 2$ | ↓ | ↓ | ↑↑ |
| | 体积 | 齿数限制 | $Z_1 \geq Z_{\min}$ | $Z_m > Z_{\min}$ | $Z_m < Z_{\min}$ |

注: ↑表示增大, ↓表示减小, -表示不变, $Z_m = 0.5(Z_1 + Z_2)$ 。

3.2.3 采用低碳合金钢材料 见表2。

4 在充满创新生机的现代齿轮技术平台上作文章

齿轮工程是一个“系统工程”, 工程的每一个环节, 都充满着创新的生机。在这个舞台上, 就创新的可塑性和效益来看, 从大到小的排列是

材料——设计——制造——检测——管理(含

售后服务)。

表 2 钢、铁的综合强度比较

Table 2 The comparison of comprehensive load capacity between iron and steel

| 材 料 | 含镍低碳钢 渗碳 淬火 | 低碳钢 渗碳 淬火 | 中碳钢 调质 | 中碳钢 | 球墨 灰口 铸铁 铸铁 |
|-------|----------------|--------------|-----------------|----------------|----------------|
| 综合强度比 | 5 | 4 | 3 | 2.3 | 2 1 |
| 齿面硬度 | ≥HRC62 硬齿面 | ≥HRC58 | ≥HVb300 中硬齿面 | ≥HVb200 软齿面 | |

4.1 材料环节上的创新

例如齿表面的“硬化”，满足重载要求；“轻型化”，满足航天要求；“软化”，满足平稳传动要求；“自润化”，满足净化的家用、办公用具要求。特别是研究高强度复合材料以取代钢材，更是走上第 4 代齿轮的热点课题。

4.2 设计环节上的创新

这是一个“无本万利”良机，从优化设计来改进齿轮传动品质，在同样材料和工艺水平下它还可从图纸上赢得高强度和低噪声的效益。各种新齿形的开发，以及作者发明的非零变位设计制出的曲齿锥齿轮技术^[3]，已初具成效。以高强度（提高 30%），长寿命（长 50%）和低噪声（低 2 dB）、小体积（小 1/3）在军品、重型机械、机床、船艇和煤矿、油田等行业上推广，创造了齿数最少为 3、单级速比最高为 $u = 37/3 > 12$ 和共线轴能传动两种速比 37/3 和 37/4 的新记录，见图 4。

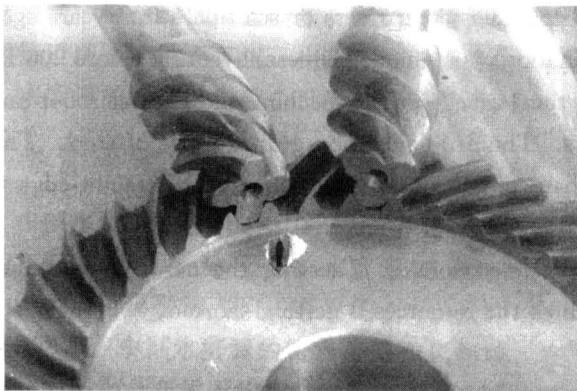


图 4 新型非零传动齿形制，齿数比 $u = 37/3$ 与 $37/4$

Fig.4 The new-type non-zero modification tooth system, gear ratio $N/n = 37/3$ and $37/4$

4.3 制造环节上的创新

在高效率精加工方面的创新，刀具推广采用立方碳化硼（CBN）新材料切齿，仍大有潜力可挖。

此外，在以质量保证为中心的精细技术管理上的创新，也大有可为。

5 展望新一代——第 4 代齿轮技术

从 2000 年到 2050 年，可以预计为由现代（第 3 代）齿轮进一步的辉煌到新一代齿轮的过渡时期。

5.1 进入 21 世纪的齿轮工业，绝非“夕阳工业”

人们在衣、食、住、行等生活需求上仍要靠农业、纺织业、工业、建筑业和交通运输业。这里面，作为生产人们物质产品的基础工业——机械工业存在，汽车、轮船、飞机存在，作为它们的主要传动零件的齿轮，随之继续存在。而逐步被淘汰的“夕阳工业”将是耗费资源、污染环境、破坏生态平衡的工业和核武器。因此，第 4 代齿轮工业是可持续发展工业。

5.2 新一代齿轮的发展趋势

为适应知识经济的需要，新一代齿轮技术的发展趋势，将会是：

| | | | | |
|----|---|-----|----|------|
| 小化 | 和 | 低材料 | 以及 | 高可靠性 |
| 净化 | | 低能耗 | | 高强度 |
| 静化 | | 低重量 | | 高转速 |

5.3 新一代齿轮创新的展望

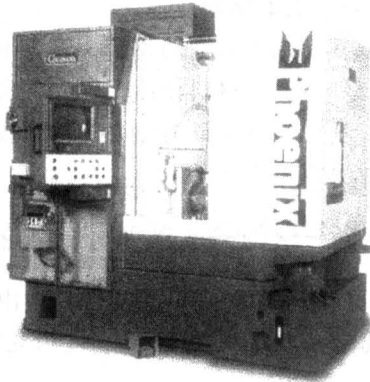
1) 材料——逐步采用质量轻、有吸振和自润滑性能的复合材料或工程塑料来大量代替矿源日益短缺的钢材。

2) 动力——仍是电力，但电力资源将更多采用核电和水电。

3) 制造——用 CNC 机床代替复杂的传动链机床。20 世纪 90 年代以来，已有许多 6 轴或多轴数控锥齿轮机床面世，例如美国、德国、瑞士、日本、中国等已推出的曲齿数控机床。美国凤凰牌曲齿锥齿轮铣齿机是新机床的代表作（见图 5）。

4) 设计——**a.** 准渐开线齿廓以其直刃便于刃磨、便于加工和利用变位改进传动品质的优点而保持主导地位；**b.** 非零传动设计将会大幅度推广；**c.** 纯滚动或低滑动的新齿形将会出现；**d.** 各种齿形制将被专家系统所代替。

这就是新一代齿轮技术创新的前景。



PHOENIX 175HC 准双曲面齿轮切齿机

图 5 美国格利森厂制造的凤凰牌数控机床

Fig.5 The PHOENIX—N. C, bevel-gear machine-tool made of Gleason Works in U. S. A.

参考文献

- [1] 梁桂明, 邓效忠, 杨伯原. 锥齿轮的发明、发展及对 21 世纪的展望 [A]. 第一届中日机械技术史学术会议论文集 [C]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 185~198
- [2] 梁桂明, 朱象钜, 黄希忠. 齿轮技术的发展趋势 [J]. 中国机械工程, 1995, 6 (3): 25~27
- [3] 梁桂明, 邓效忠, 何兆旗. 新型非零传动曲齿锥齿轮技术 [J]. 中国机械工程 1997, 8 (1): 97~101

Innovation and Trend of Gears-Technology

Liang Guiming

(Luoyang Institute of Technology, Luoyang 471039, China)

[Abstract] “How were the earliest gears invented? Where were the sources and uses of the earliest gears? It is the mystery for men to unravel in a century.

This mystery seems soluble by unearthed gears or by “un-seaed” gears which were discovered from China, India, Greece, Rome and Egypt in 2 000 years ago.

But these gears made of bronze or cast-iron are mere 2nd-generation gears. The 1st-generation gears made of wooden. The invention of 1st generation gears would be accompanied with water machine——water mill for grinding grain. In ancient-civilization countries people lived together along rivers or sea-side 4 000 years ago. They came into contact with water. The “South-Pointing Chariot” is a unique Chinese invention before 200 B. C. It is the 1st set of differential mechanism in the world, the 1st self-control machine and the 1st robot machine in the world. It is the essence of 2nd-generation gears. The 3rd-generation gear is made of steel. This modern gears began at industry-revolution in 1800. The characteristics are using cutter with straight-edge to generat involute profile gears by mass production.

The 4th-generation gear will be coexisting with knowledge-economics. Creating the new high-strength composite materials and plastics to substitute for steel, of which the resources is getting shorten, will mark the beginning of the 4th-generation gears.

The trend of innovation of gears in the coming 50 years will be seeking miniaturization, puification and quietness, developing high-reliability, high-capacity, high-velocity and low-consumption of material, energy and weight.

[Key words] gears; innovation; trend