

齿形与齿轮强度

宋乐民 著

国防工业出版社

78.246

8705629

齿形与齿轮强度

宋乐民 著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书全面系统地叙述了渐开线齿轮齿向修形、齿高修形及齿形角等因素对齿轮强度的影响。并且给出了有关的结构设计公式，参数选择和强度计算方法。全书自始至终贯彻理论联系实际的原则，从解决生产实际问题出发，通过理论分析和试验证明，最后上升为指导实践的理论。书中列有很多图表及试验数据，并有计算例题。

本书可作为机械工程技术人员关于渐开线齿轮修形方面的参考书，亦可作为大专院校的教学参考书。

齿形与齿轮强度

宋乐民 著

责任编辑 张仁杰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张11¹/₂ 302千字

1987年7月第一版 1987年7月第一次印刷 印数：0,001—6,100册

统一书号：15034·3145 定价：2.60元

序 言

渐开线齿形是最早应用于机械设计中的，而且也是目前使用最为普遍的一种齿形。该齿形之所以有这样持久的生命力，是由于它有着独特的优点。比如，传动平稳、承载能力大、使用寿命长、制造容易和维护方便。人们对标准的渐开线齿形有了一套比较成熟的设计方法、强度计算方法和加工方法。然而，随着机械制造业的飞跃发展，对渐开线齿轮传动提出了更高的要求。特别是航空工业所用的齿轮，要求传递载荷大、尺寸小、重量轻、工作可靠。这就向设计和制造者提出了新的课题：如何在保持渐开线齿形原有的优点前提下，再进一步改进这种齿形的设计，以使它在有限的尺寸条件下获得更大的承载能力，延长使用寿命和进一步改善啮合传动性能。

显而易见，改进设计的重点仍然是齿形。因为它是影响渐开线齿轮承载能力和使用寿命诸因素中最主要的因素。生产实践和理论分析告诉我们：对渐开线齿形沿齿向和齿高作适当的修形，对提高渐开线齿轮的承载能力和使用寿命有着显著的效果。但是，对于修形，人们还很少把它做专门的问题来研究。虽然50年代提出来的概念并有应用，但到70年代初才开始有比较深入的研究^{〔1〕〔2〕〔4〕}。关于这方面的问题，至今还有很多不清楚的地方，还没有一套完整的设计方法和强度计算方法。人们对这种齿形在提高齿轮承载能力方面的重要意义认识得还很不深刻。所以，对这种齿形的深入研究，不仅可以提高渐开线齿形的承载能力，而且还将推动弹性接触理论的发展。

本书试图作为一个完整的总体来处理渐开线齿轮修形专题，其目的在于直接或间接地涉及修形齿对齿轮强度影响给予普遍地注意和重视，最终的目的是使修形成为一项有价值的设计方法。

为此，本书首先对生产中常见的齿轮故障，做了介绍和进行了必要的分析，以求找到齿形与齿轮强度之间的直接关系，帮助读者深刻认识齿形对提高齿轮承载能力的重要性。第二章重点分析了影响齿向形状的诸因素，以及这些因素是如何影响齿轮强度的。并对国外介绍的有关考虑这种影响的一些计算方法进行分析，并辅助以试验，最后给出有关空间几何因素对啮合歪斜度影响的计算公式。第三章和第四章是本书的重点，它以古典的弹性接触理论为基础，对齿向修形从理论上进行了深入的分析推导，并与国外所介绍的有关资料进行了比较，最后给出了有关等半径圆弧形鼓形齿、带鼓形的螺旋线修形齿和齿端修形齿的结构设计计算公式、参数选择和强度计算方法，并辅助以试验证明。所推荐的理论公式，不仅是理论分析，而且指导了生产实践，并被实践所证明是正确地。第五章把齿形角对渐开线齿轮的承载能力和传动性能的影响给予理论分析和试验证明，证明用古典的赫兹(HERTZ)理论公式，已反映不出齿形角对齿轮强度影响的全部。这种分析，为进一步研究齿面间的相对滑动对齿轮强度的影响，提供了实例。第六章通过试验，从理论上研究了轴向力的匹配对圆锥齿轮错位的影响，并给出了改善这种错位的方程式；和介绍了沿齿高修形对提高齿轮抗胶合能力的影响。第七章简单介绍了有关修形齿的加工方法。

总之，本书所推荐的各种设计和计算方法适用范围很广，它的应用无疑将促进使用、研究和经验交流。在这里，作者对上述问题，提出了一些自己的见解，给出了解决这些问题的一些具体设计公式、图表和试验数据。根据这些设计修形齿是可以得到比较满意的结果的。

本书中部分内容曾分别在沈阳市、辽宁省和全国性学术年会上被评为优秀论文，航空工业部1981年科技理论成果奖和全国第一届科学大会奖。在评审过程中曾得到沈阳机电学院机械零件教研室主任颜世一副教授，吉林工业大学机械零件教研室主任郑志锋副教授和航空工业部齿轮强度规范编制组全体同志的启示和帮

助，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不当之处，敬请读者不吝赐教。

宋 乐 民

于沈阳黎明机械公司

目 录

第一章 轮齿故障	1
§ 1 故障的统计	1
§ 1.1 磨损剥落故障	3
§ 1.2 齿面塑性变形故障	5
§ 1.3 胶合撕伤故障	6
§ 2 故障的初步分析	7
§ 2.1 压陷故障的分析	7
§ 2.2 磨损剥落故障的分析	13
§ 2.3 胶合撕伤故障的分析	15
第二章 齿宽上的载荷分布	18
§ 1 有限长线接触的变形和应力	18
§ 2 齿轮的一端接触	24
§ 2.1 载荷的分布模型	25
§ 2.2 一端接触对轮齿工作应力的影响	27
§ 2.3 一端接触的试验	37
§ 3 啮合歪斜度	54
§ 3.1 影响因素的分析	54
§ 3.2 啮合歪斜度的计算公式	55
§ 3.3 空间几何因素引起的啮合歪斜度	64
§ 3.4 各种歪斜度之间的补偿问题	100
§ 3.5 结论	103
第三章 螺旋线修形齿的设计	105
§ 1 鼓形齿	105
§ 1.1 鼓形齿的结构设计	105
§ 1.2 鼓形量的确定	109
§ 1.3 鼓形中心的确定	118
§ 1.4 等半径鼓形齿的试验与试算分析	119
§ 2 螺旋线修形	140
§ 2.1 螺旋线修形量和鼓形量的确定	142
§ 2.2 螺旋线修形齿的试验	144

- § 3 齿端修形.....146
- § 4 结论.....149
- 第四章 螺旋线修形齿的轮齿强度计算**150
 - § 1 对目前计算方法的认识.....150
 - § 2 弹性接触理论的基本方程.....161
 - § 3 点接触的赫兹解.....164
 - § 3.1 接触弹性体的表面几何关系.....165
 - § 3.2 点接触的赫兹理论解.....170
 - § 4 线接触的赫兹解.....172
 - § 5 螺旋线修形齿的接触应力.....175
 - § 5.1 鼓形齿的接触应力.....176
 - § 5.2 螺旋线修形齿的载荷分布系数.....181
 - § 6 理论计算与试验.....185
 - § 6.1 接触试验与计算.....187
 - § 6.2 弯曲强度试验与计算.....197
 - § 7 倾斜情况下的强度计算.....207
 - § 7.1 偏心量的计算.....208
 - § 7.2 倾斜情况下的最大比载荷.....210
 - § 7.3 鼓形齿倾斜情况下的试验.....220
 - § 8 齿端修形齿的强度计算.....225
 - § 8.1 接触长度大于设计修形段情况.....226
 - § 8.2 接触长度小于设计修形段情况.....227
 - § 9 结论.....230
- 第五章 齿形角与轮齿强度**234
 - § 1 问题的提出.....234
 - § 2 齿形角对磨损剥落的影响.....236
 - § 2.1 齿面的滑动.....241
 - § 2.2 齿面间的摩擦系数.....252
 - § 2.3 齿形角对弹性流体动力润滑的影响.....259
 - § 2.4 齿形角与其它参数的关系.....264
 - § 3 不同齿形角齿轮的对比试验.....267
- 第六章 圆锥齿轮的齿形与轮齿的抗胶合能力**276
 - § 1 错位原因的分析.....277
 - § 2 错位的后果.....286
 - § 3 提高圆锥齿轮承载能力的措施.....302

§ 3.1 双重着色	302
§ 3.2 轴向力的匹配	305
§ 3.3 齿顶修缘	320
§ 4 结论	330
第七章 修形齿的加工	331
§ 1 磨齿机床	331
§ 2 齿向修形	331
§ 3 齿高修形	336
§ 3.1 齿高修形的基本原理	336
§ 3.2 齿高修形的方法	338
§ 4 铣、刨加工	341
附录一 有关端部修形设计与强度的一种数值近似计算	
方法——切片法	342
附录二 非赫兹弹性接触问题的数值解	349
参考文献	359

第一章 轮齿故障

轮齿的破坏，会使整个设备丧失工作能力。结果又不及时修复，将造成相当大的经济损失。为了从齿形设计上能够最大限度地提高轮齿承载能力、减少轮齿故障，必须讨论轮齿的破坏位置、破坏形式和破坏的原因。本书对几种不同类型的传动齿轮在使用过程中常见的故障进行了统计，这些齿轮的基本参数见表1-1，其工作条件为：

传动的输入或输出的最大转速为12000r/min，传动的最小功率为零点几马力，最大为500多马力。其支承轴承都是滚动轴承，润滑方式是强力或飞溅润滑。所有轮齿表面都经过了硬化处理（渗碳、氮化或碳氮共渗）。

§1 故障的统计

轮齿故障是由设计、选材、工艺、热处理、装配和使用等各种因素综合作用的结果。但是，在这些综合作用因素中总有一个起主要作用的。只有找到起主要作用的因素之后，我们才能正确地认识轮齿故障的本质，也只有抓住本质问题，才能以最小的代价，给以最有利的处理。

故障率最高，而且影响比较大的常见故障是齿面磨损剥落、齿面接触塑性变形和齿面胶合撕伤。当然，还有其它类型的故障，比如，个别轮齿掉块，轮齿全部损坏等，由于它们不带有普遍性，故不是本书所述及的重点。这里重点研究前三种故障的特点、规律和影响因素，以便寻找带有普遍意义的改进措施。

首先应明确所谓的故障率，它的含义是：在一定期间，如一个寿命期，在某一定数量的传动齿轮的轮齿破坏数与在同一时期内的被统计的齿轮数之比，即：

$$\epsilon = \frac{\text{产生故障的齿轮数}}{\text{被统计的总齿轮数}} \times 100\%$$

故障性质不同，其故障率的变化规律也不同。

表1-1 传动齿轮参数一览表（统计总数为73种，表中百分比为占总数的）

齿形	正齿轮	74%	几何参数	轴交角	90°	26%	
	圆锥齿轮	26%		变位系数	0	93.6%	
齿轮材料	12Cr2Ni3A	12.3%	精度参数	齿根R	±0.211~0.262	6.4%	
	12Cr2Ni4A	83.6%		(mm)	单R	0.05~1.3	81.2%
	30Cr2Ni2WA	1.4%			双R	1.2~1.8	18.8%
	38CrMnAlA	2.7%		粗糙度	$R_a > 1.6$	28.8%	
化学热处理	渗碳层 (mm)	0.3~0.6	39.4%	$R_a > 0.32 \sim 1.25$	71.2%		
		0.6~0.9	37.2%	最大基节差 (mm)	≤0.012	14.6%	
		0.9~1.2	1.4%		>0.012~0.015	45.8%	
	氧化层 (mm)	0.1~0.3	15.1%		>0.015~0.02	16.7%	
		0.25~0.4	5.5%	>0.02	22.9%		
		氮化层 (mm)	0.1~0.3	1.4%	齿圈跳动 (mm)	≤0.04	9.6%
几何参数	模数 (mm) / 齿数		≤1.5/14~50	21.9%		>0.04~0.06	79.4%
			>1.5~2/14~66	22.1%		>0.06~0.08	9.6%
		>2~3/10~52	44%	>0.08	1.4%		
		>3~4/16~20	8.2%	齿形公差 (mm)	≤0.012	17.8%	
		>4~4.5/16~25	2.8%		>0.012~0.015	71.7%	
齿形角	20°	97.2%	>0.015	10.5%			
	25°	2.8%	齿向偏差 (mm)	≤0.012	23.2%		
齿顶高系数	1	75.3%		>0.012~0.015	64.3%		
	0.8	24.7%	>0.015	12.5%			
侧隙 (mm)	正齿轮0.07~0.26	74%	支承形式	悬臂	23.3%		
	圆锥齿轮0.15~0.35	26%		简支	76.7%		

§ 1.1 磨损剥落故障

严格地说磨损和剥落是两个性质不同的故障。

齿面磨损，是指在啮合过程中，材料从轮齿接触表面摩擦损失的现象。其中又分：

1. 正常磨损：轮齿工作初期，磨损速度缓慢的不可避免的齿面磨损。其特点是磨损速度低，磨损后的表面光亮，没有宏观擦痕。在齿轮的预期使用寿命内，对啮合性能没有不良影响。

2. 磨粒磨损：由于外界细小颗粒物质进入轮齿啮合面而引起的齿面材料的损失。其特点是磨损速度较正常磨损快，在显微镜下，可见齿表面沿滑动速度方向有互相平行的浅道。

3. 干涉磨损：由于轮齿啮合干涉引起的齿面磨损。其特点是轮齿根部齿面被挖出沟，与其接触啮合的轮齿顶部被碾挤变形。轻微的干涉引起齿面磨损，增加运动噪声。但严重的干涉，则由于齿形的严重破坏而导致该对齿轮的完全失效。

4. 刮伤：齿面沿滑动速度方向分布较深的刻痕。刮伤后由于温度升高，磨损速度加快，齿形遭到明显破坏。

5. 齿面剥落：是指轮齿在啮合过程中，在超过材料耐久极限的交变接触应力的反复作用下，由于滚动和滑动摩擦的存在，致使齿面表层产生疲劳裂纹，进而扩展，使表层金属小块脱落而形成的齿面损伤。就其损伤程度不同又分：

① 早期点蚀：在运转初期就发生的一种齿面疲劳现象。它往往发生在节线附近靠近齿根部，疲劳脱落的麻坑比较小而浅，麻坑的数目不多，分布范围也不大。

② 扩展性点蚀：点蚀的麻坑比较大而深，并沿接触线全长扩展，分布较大。此时，齿形遭到破坏，动载荷增大，传动平稳性降低，噪声加大，以致迅速失效。

③ 剥落：是硬齿面轮齿在重载作用下，表层或次表层材料以相当大的金属颗粒成片从齿面剥落的齿面损伤。剥落后的凹坑较疲劳点蚀的大而且深，但分布范围一般较小，凹坑的断面较

整齐。

试验证明，材料的耐磨性能低于材料的耐疲劳能力（见图5-17），试验后的重量虽有损失，但是齿面并没有点蚀发生。所以，本书在研究这一问题时并未作严格的区分，而以它们综合作用失效做为统计依据。

统计结果表明，这种性质的故障率具有动态特征，而且是随使用寿命的增加其故障率也增大，见表1-2，图1-1中曲线1，2。

表1-2 不同性质的故障率 e (%) 与寿命的关系

寿命 (小时)	100	200	300	图1-1中之曲线
故障性质				
正齿轮齿面磨损剥落	2.4	5	5.8	1
圆锥齿轮齿面磨损剥落	34.1	39		2
正齿轮齿面压陷	13	13	13	3
圆锥齿轮齿面胶合	60	60	60	4

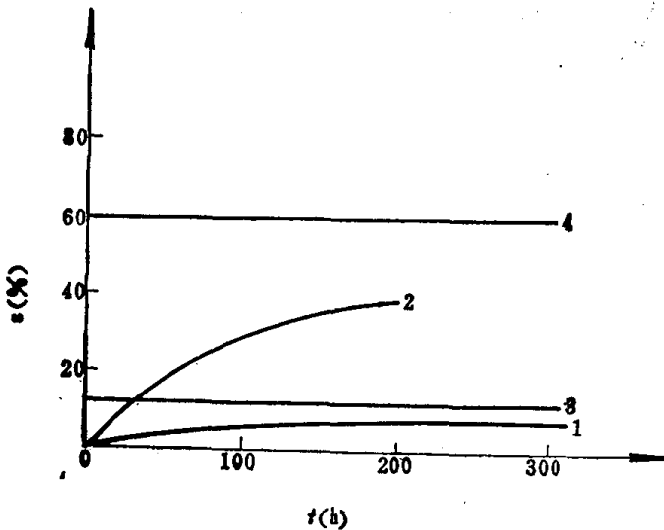


图1-1 不同性质的故障率 e 与工作寿命的关系 (图中序号
含意，见表1-2)

在最初工作的寿命内，其故障率增加得较快，随后增加得就很少了。不管正齿轮，还是圆锥齿轮都有相同的规律。

这种故障率和材料的抗疲劳能力有直接关系，故从道理上讲，应在寿命小于100小时时，故障率达到最大值，但统计结果是向后推迟了。其原因是：使用载荷是随工作状态变化的，见表1-3。

表1-3 工作状态与加载情况

工作状态	工作时间(h)	转速 n (r/min)	传动功率比 P_i/P_{max}
加力状态	10	8920	1
最大状态	5	8920	1
额定状态	40	8920	1
0.9额定	13	8028	0.9
0.8额定	12	7136	0.8
0.7额定	6.7	6244	0.7
0.6额定	5	5352	0.6

显然，要达到载荷超过疲劳极限的持久循环次数需要的时间当然要长。另一方面，在交付使用第一个寿命期后进行第一次修理，这时故障才开始出现，但不一定达到轮齿破坏的程度。

总之，要减少这种性质的故障率，只能想办法提高材料的抗疲劳能力或降低作用在齿面上的外载荷，改善齿面工作条件，如减少滑动，增加润滑等。

§ 1.2 齿面塑性变形故障

在重载作用下，齿面因材料屈服而发生塑性流动，造成齿面塑性变形。这种损伤通常发生在软的齿面，但有时也可能发生在淬火硬化处理的齿面。本书所研究的就是硬齿面。这种塑性变形分为：

压痕：齿面呈现凹痕（见图1-2），严重压痕可能使齿面局部产生塑性变形，甚至导致啮合发生干扰。

峰谷、飞边、波纹和隆起等故障，都属于塑性变形。本书重点研究压痕故障。

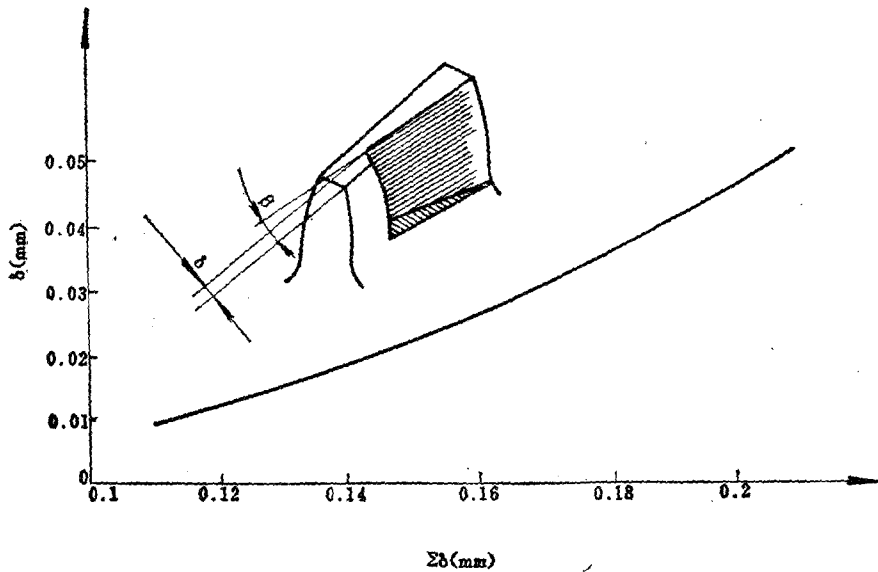


图1-2 压陷量 δ 与装配间隙 $\Sigma\delta$ 的关系

统计结果表明,这种性质故障的故障率与使用寿命关系不大,见图1-1中曲线3。显然,这种故障与材料的抗疲劳能力无关,而和材料的抗压能力有关——在重载作用下齿面因材料屈服而发生的塑性变形能力。有时传递的名义载荷并不大,而由于其它原因所造成的附加载荷很大,如载荷集中,也能产生这种故障。理论分析与试验证明,载荷集中的主要影响因素是装配间隙。所以压陷深度和装配间隙有一定的关系(见图1-2)。

§1.3 胶合撕伤故障

随着齿轮切线速度的增大,这种性质的故障越来越多,而且圆锥齿轮多于正齿轮。

胶合撕伤根据形成原理,又分为热胶合撕伤与冷胶合撕伤两

种。热胶合撕伤，在高速传动中，当法向压力较大，滑动速度很高时，摩擦表面温升很高，油膜破坏使接触点的表面金属熔焊在一起。当切向滑动时，齿面被撕裂形成沟纹，并伴有高温烧伤变色。冷胶合是由于局部压力很高，轮齿表面油膜被压破，造成两轮齿金属表面直接接触，受压产生塑性变形后，实际接触点由于分子相互扩散和局部角结晶而产生冷焊胶合，当切向滑动时，胶合点被撕开，形成冷胶合撕伤。

本书研究的重点不在于分辨两种撕伤的性质，而着重于后果。统计结果表明，这种性质的故障与寿命关系不大，而且工作时间很短（几秒钟）即可出现这种故障。只要载荷和滑动速度不继续增加，其损伤不再发展（见图1-1中曲线4）。

试验证明这种故障与齿轮的工作状态有很大的关系，往往出现在顶刃啮合情况下。

§ 2 故障的初步分析

本节是通过对大量批生产的零件所暴露的故障进行模拟再现和所采取的预防措施来加以说明故障的诱因性质，进而说明它的机理。

§ 2.1 压陷故障的分析

所研究的压陷故障的典型零件，如图1-3所示的一对悬臂支承的内啮合副的外齿主动齿轮，其故障现象，如图1-4所示。传动副的原始参数，见表1-4。由表1-4不难看出，齿轮副所选用的材料是优质合金钢，所采用的工艺方法是比较先进的磨削工艺，精度要求比较高，见表1-5。故障件一般属于航标HB0-91-76之6-5-5级。另外，该故障件所传递的名义载荷远远小于主要原始参数基本相同的其它零件（包括圆锥齿轮），见表1-6。

综上所述可知，所研究的故障件，不管在选材、工艺方法和精度要求上都是比较理想的。而且所传递的载荷相对其它无故障的相似零件小很多，一般来说是不应有故障的。然而，故障是客

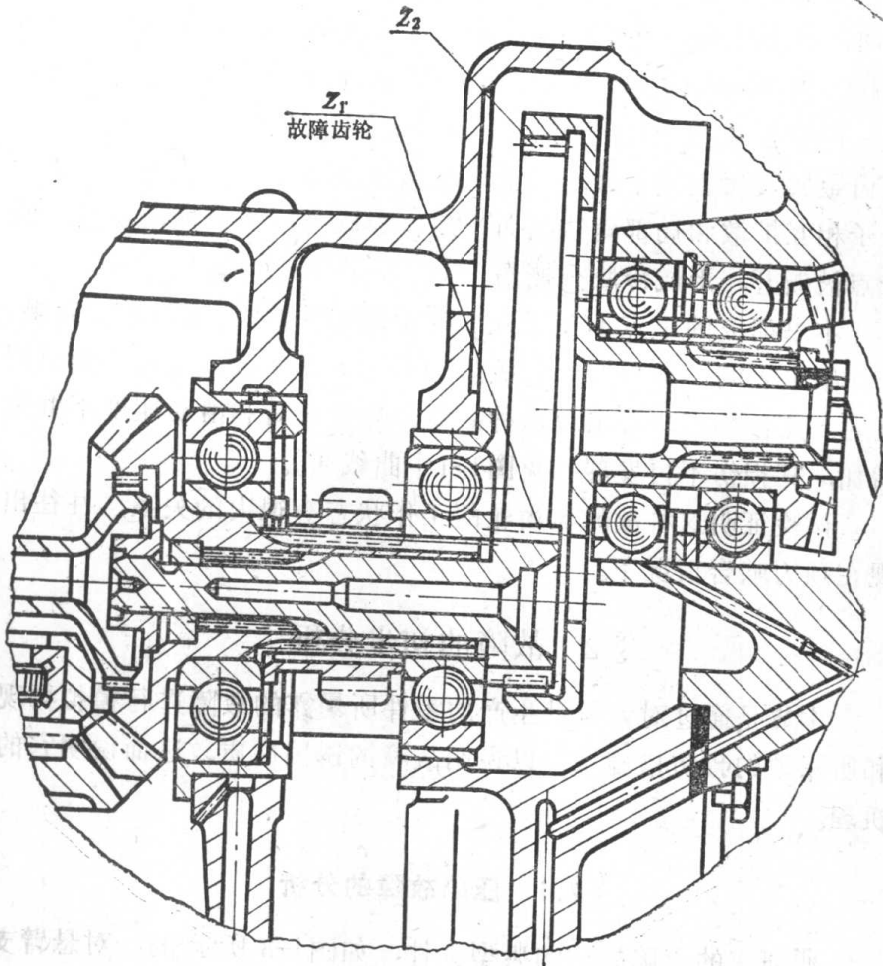


图1-3 压陷故障件的装配情况

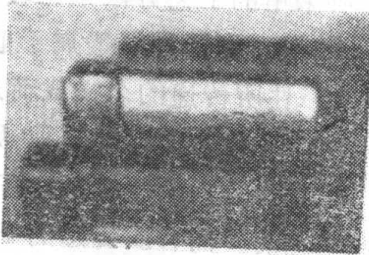


图1-4 压陷后的齿面状况