

齿轮胶合强度优化设计 计算与选参封闭图

王松年 著



中国铁道出版社

4

齿轮胶合强度优化设计计算与选参封闭图

王松年 著

中国铁道出版社出版

责任编辑 宋黎明 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：850×1168毫米 1/32 印张：7.75 字数：115千

1986年6月 第1版 第1次印刷

印数：0001—4,000册 定价：3.10元

内 容 提 要

本书系齿轮胶合强度优化设计与计算方面的专著。其内容包括：ISO齿轮胶合计算基本原理；齿轮胶合强度的优化设计及最佳参数选择；胶合强度计算方法的创新和选择最佳参数及其数值时使用的大量等温曲线（或等温面积）封闭图。

本书利用最优化方法，解决了原“ISO齿轮胶合计算原理”只能用于校核计算但无法用来进行初始设计这一关键性问题，还给出了新的胶合瞬时闪温计算公式。利用本书方法进行设计时，在保证提高胶合承载能力的同时，还可提高齿面接触强度和齿根弯曲强度。除此以外，本书还给出了大量优选设计参数及其数值的曲线封闭图，因而也是极好的工具书。

本书可供工程技术人员从事齿轮胶合强度设计与研究用，也可供大专院校教师参阅，或做为辅助教材使用。

前 言

随着齿轮传动向高速重载方向发展，在轮齿的失效形式中，除了一直为大家所重视的齿面疲劳点蚀和齿根弯曲折断外，越来越多的运用实践已证明，轮齿齿面的擦伤与胶合已成为第三种常见的失效形式。由于这种失效形式的不易觉察和不易控制，它就更具有危险性。因为疲劳点蚀和弯曲往往是与时间相关的破坏，在预先确定它的使用寿命后，可以通过与循环次数有关的疲劳极限应力加以控制。而齿面擦伤与胶合则不然，它的出现与时间无关，常常在预期寿命内突然发生，并且一旦发生，即将导致齿面渐开线形状的严重破坏及齿面间润滑状态的进一步恶化。严重时，随着轮齿断面的不断变薄，最终将导致轮齿突然折断。故这种失效形式是有很大的潜在危险的。也应提到，很多设计人员及运用部门，往往只重视齿轮能否运转，而不注意运转质量的好坏，从而忽略了那些已经发生轻度擦伤与胶合的齿轮，在继续“带伤”工作时给与之相联接的其他零部件的强度、寿命、能源消耗及工作质量带来的巨大损失。实际上，这些问题是与前面所提到的潜在危险有同样危害性的。

作者对齿轮运用所做的简单调查已经表明，轮齿齿面擦伤与胶合情况已是相当严重。例如，在舰船的主传动中，已经出现了严重的胶合失效；航空工业中的高速齿轮传动也面临出现胶合现象的危险；至于铁路系统的内燃机车与电力机车牵引动力齿轮，其擦伤与胶合失效情况更为严重。仅以内燃机车牵引动力齿轮为例，根据机车返修厂有关检验记录资料〔22〕的统计，仅1981、1982两年，由于擦伤与胶合，大齿轮每年更换率为12%左右，小齿轮则更为严重。而带伤继续使用的齿轮中，胶合平均占80%。

上述情况说明，对于高速重载齿轮传动，必须认真对待其擦

伤与胶合现象，尽快解决其胶合强度的设计计算问题，以达到提高其胶合承载能力之目的。

近些年来，国外对齿轮的擦伤与胶合进行了大量的研究，提出了很多理论与计算方法，并进行了试验验证，其中以被国际标准化组织所肯定的“ISO/TC60/WG6齿轮胶合承载能力计算原理”最为完善，现已被确定为国际标准而试行。我国还没有自己的齿轮胶合计算原理及标准，由于各国的齿轮标准都在向ISO国际标准靠拢，预计我国也将吸取和运用该标准的基本内容制订新中国标，这就使齿轮研究者和设计者面临如何研究和运用ISO标准的问题。

在运用ISO齿轮胶合计算原理时，我们将会看到，它还存在一些较大的缺陷，由于它只是一种校核式，只能用来核算已设计完的齿轮胶合强度安全系数，无法根据抗胶合性能要求进行选参设计，特别是无法在设计工作的开始，即按预期要求优选某些设计参数进行设计，以获得最佳方案。其次，它的计算公式都极为繁琐复杂，计算工作量很大，如需变换参数值进行比较性设计就更加困难了，这就使“计算原理”无法用来解决提高胶合承载能力的问题。因此，原始的ISO齿轮胶合计算原理有很大的局限性。本书针对“计算原理”所存在的上述问题，采用最优化的方法进行了通用化的设计计算，根据所得到的结果，绘制了大量曲线封闭图，可用来选择主要设计参数并达到最佳抗胶合性能。利用优化设计的结果，推导出极为简单的布洛克闪温与积分温度计算公式，从而使计算工作大大简化而又保持了足够的准确性。

由于大刀具角齿形得到日益广泛的研究和应用，书中除正常齿高的标准刀具角齿形外，对 $h'_a = 1$ $\alpha = 22.5^\circ$ 、 $h'_a = 1$ 及 0.9 $\alpha = 25^\circ$ 的大刀具角齿形也进行了最优化。而且，通过对不同刀具角齿形的优化结果及其他因素的综合比较，还得出以下结论：齿顶高系数为1刀具角为 25° 的大刀具角齿形具有最佳的抗胶合性能。这种齿形不仅提高了胶合承载能力，还同时提高了接触强度和弯曲强度，因而，这种齿形是全面提高齿轮强度指标的有力措施。

本书包括两部分，第一部分主要是齿轮胶合计算原理简介，胶合强度的优化设计与计算，以及为帮助读者掌握本方法所列举的例题。此外，在ISO齿轮胶合强度标准尚未公开发行的情况下，为便于读者了解掌握该标准，便于本书引用和说明问题，将ISO原标准附录在第一部分之后。第二部分则是全部各种齿形的曲线封闭图，它们是用来优选设计参数使用的，因而本书也可作为设计与研究者的工具书。

在ISO齿轮胶合承载能力计算原理中，包括布洛克闪温计算和积分温度计算两种方法，国际标准化组织拟试行一个阶段后再确定其中之一做为最后标准。由于国内外对两种方法的优劣尚在论证中，故本书将两种方法都做了论述，以便不同行业根据自己的实际情况去运用验证，最后做出适当的结论和合适的选择。

应当提到的是：由于齿轮胶合的某些机理尚未完全搞清，目前的ISO胶合计算原理也不可能尽善尽美，随着研究的不断深化和发展，还会有局部的改动，基于这一原因，本书所给出的优化设计及计算方法，还会有不足之处，垦切希望读者提出宝贵意见，以使本书内容更加完善。

作者的研究工作得到太原工学院朱景梓教授、北京钢铁学院余梦生副教授、大连工学院胡西樵与马书山副教授、铁道部工业局曹俊密、大连内燃机车研究所顾子兴高级工程师、三机部齿轮标准组以及大连机车厂设计科与工艺科一些同志的大力支持和帮助，仅借此机会表示作者的衷心谢意。本书中借用了资料〔8〕〔9〕中的原始封闭图，特此说明并致以敬意。

作 者

1984年10月

主 要 符 号*

- $\theta_{fl,a}(T_f)$ ——瞬时闪温, °C
 $\theta_{fLo1,2}$ ——啮入啮出弧上的最高瞬时闪温, °C
 θ_M ——齿轮本体温度, °C
 $\theta_B(T_B)$ ——瞬时接触温度, °C
 $\theta_s(T_s)$ ——齿面胶合极限温度, °C
 $\theta_{oil}(T_{oil})$ ——齿轮润滑油工作温度, °C
 W_c ——计算线载荷, N/mm
 $\mu_{m,y}(f_m)$ ——平均局部摩擦系数
 R_a ——齿面粗糙度, μm
 $\eta_m(E_m)$ ——工作温度时的滑油粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$
 $V_\Sigma(V_m)$ ——切向速度和, m/s
 $\rho_{red}(P_{red})$ ——当量曲率半径, mm
 X_m ——闪温系数, $\text{K}\cdot\text{N}^{-3/4}\cdot\text{S}^{1/2}\cdot\text{m}^{-1/2}$
 $X_B(x_c)$ ——几何系数
 $X_r(y)$ ——沿啮合线上载荷分配系数,
 V ——齿轮圆周速度, m/s
 A ——齿轮传动中心距, mm
 $\Gamma(H)$ ——啮合线上的线性坐标参量,
 $\alpha_y(x)$ ——接触点处的啮合角, °
 $\alpha_i'(x_i)$ ——节点处啮合角, °
 $\alpha_i(x_0)$ ——刀具角, °
 S_B ——闪温法的安全系数,
 θ_{crit} ——胶合临界温度, °C
 X_w ——焊合系数
 $[S_B]$ ——闪温法的许用安全系数
 g_m ——等抗胶合几何系数
 $h'_o(h_o)$ ——齿顶高系数
 x_Σ ——变位系数和
 $x_{1,2}$ ——主、从动齿轮变位系数

- $Z_{1,2}$ ——主、从动齿轮的齿数
 m ——模数, mm
 σ ——分离系数
 u ——齿数比, 定义为 Z_2/Z_1
 $\alpha_{o1,2}(x_{o1,2})$ ——主、从动齿轮齿顶压力角,
 C ——齿轮胶合工况系数
 ε ——端面重合度
 $\varepsilon_{1,2}$ ——小齿轮齿顶与齿根重合度
 $\theta_{t,wt}$ ——积分温度, °C
 $\theta_{fl,atnt}$ ——啮合线上的平均温度, °C
 $\theta_{fl,atE}$ —— ε 为1时小齿轮齿顶瞬时闪温, °C
 X_e ——重合度系数
 $(X_B)_E$ ——小齿轮齿顶几何系数
 X_o ——转向系数
 X_{co} ——齿顶修形系数
 $S_{s,t}$ ——积分温度法的安全系数
 $\{S_{s,t}\}$ ——许用安全系数
 $\theta_{s,nt}(T_{s,nt})$ ——积分温度法胶合极限温度, °C
 g_E ——积分温度法的等抗胶合几何系数
 $W_{1,2}$ ——齿顶及齿根部分的温度面积
 S ——积分温度法齿轮胶合工况系数
 E ——闪温变化系数
 $D_{f,1,2}$ ——齿根圆直径, mm
 $D_{e,1,2}$ ——齿顶圆直径, mm
 $L_{1,2}$ ——实际啮合线端点至节点距离(CA 及 CE), mm
 $L_{s,4}$ ——理论啮合端点至节点距离(CN_1 及 CN_2), mm
 x_A ——啮入始点 A 处啮合角,
 x_B ——小齿轮单齿啮合最低点 B 处啮合角, °
 x_D ——小齿轮单齿啮合最高点 D 处啮合角, °
 x_E ——啮出点 E 处啮合角, °
 B ——源程序中计算常数

*注: 以上带括号的符号系校核源程序中改用的符号。

目 录

第一部分 齿轮胶合强度的优化设计与计算

概 述	1
第一章 BLOK闪温法的优化设计与计算	5
§ 1—1 闪温法发展简介	5
§ 1—2 闪温法优化目标函数的确定	11
§ 1—3 闪温法优化设计变量的选择	14
§ 1—4 闪温法优化设计中的约束	17
§ 1—5 闪温法优化结果及等温曲线封闭图	19
§ 1—6 闪温法计算公式的创新	24
§ 1—7 优化效果及计算误差分析	27
第二章 积分温度法的优化设计与计算	33
§ 2—1 积分温度法发展简介	33
§ 2—2 积分温度法优化目标函数的确定	37
§ 2—3 积分温度法的优化变量及约束	39
§ 2—4 优化结果及等温度面积曲线封闭图	40
§ 2—5 积分温度法计算公式的创新	42
第三章 齿轮胶合强度校核及设计计算的应用	45
§ 3—1 齿轮胶合强度校核计算通用源程序	45
§ 3—2 齿轮胶合优化设计及计算方法应用	48
附录 1:	
《胶合承载能力计算》	64

第二部分 齿轮胶合承载能力优化选参封闭图

概 述	89
优化选参曲线封闭图之 I	91

优化选参曲线封闭图之 II149

优化选参曲线封闭图之 III176

优化选参曲线封闭图之 IV203

附录 2:

常用渐开线函数表230

参考文献233

第一部分 齿轮胶合强度的 优化设计与计算

概 述

轮齿齿面间的工作情况如同两个接触着的圆柱面间的滚滑运动，由于接触面间存在相对滑动，就必然会产生摩擦，引起发热，使齿面的温度升高。虽然在大部分齿轮传动中，通常总使用各种各样的润滑，但由于机器运转中的振动，齿面间滑动速度方向的不断变换，轮齿啮入与啮出时润滑的边界条件差，边缘冲击以及经常起动、变速和停车等，即使有良好的润滑措施，也还是难于形成良好的润滑状态，在一般的情况下，齿面间经常是处于边界润滑状态。

轮齿齿面间这种恶劣的工作状态，常常会导致齿面间金属的直接接触，从而使摩擦加剧，发热增加，接触处温度不断上升，最后达到金属的熔化状态，使局部焊合在一起。当齿面继续相对滑动时，就会产生相互撕裂及金属的迁移现象，在齿面上形成径向划痕，严重时产生较深的“犁沟”。我们将齿面这种失效形式称为擦伤与胶合。有时，由于偏载或齿面光洁度不高，使局部接触应力过大，由挤压而产生的塑性变形也会使齿面局部接触处产生胶合，但这与前者是不同的，当克服局部接触应力过大现象后，这种胶合可以自愈。通常我们将前者称为“热胶合”，后者称为“冷胶合”，本书所要研究的是“热胶合”问题。

在摩擦学中，胶合被称为粘着磨损，在我国齿标 GB3840-83中，胶合也被列入磨损失效的范围。作者认为，一般磨损与胶合相比，无论是从机理上还是从作用结果来看，两者都是有较大差别的，前者常常是一种均匀的缓慢的表面金属损失过程，它主

要是影响齿轮的使用寿命；胶合则不然，它一旦发生，即将导致齿面渐开线形状的严重破坏，使传动质量急剧下降，摩擦功率损失不断增高，于是齿面温度又进一步升高，形成胶合的恶性循环，而使齿面很快失效。对于高速重载齿轮，齿面擦伤与胶合现象是主要的，因而受到人们越来越多的关注，对如何提高齿轮胶合承载能力进行了大量的研究。

国外对齿轮擦伤与胶合的研究已有很长的历史，曾先后出现了J·O·ALmen的摩擦能量准则；D·Dowson与G·R·Higginson的油膜厚度准则；G·Niemann与G·Lechner的油膜强度准则以及H·BLOK、H·Winter与K·MichaeLis的温度计算准则。这些准则都有自己的特点和试验依据，其中，温度计算准则受到世界上大多数国家的公认，现已被确定为齿轮胶合的国际标准而试行，这就是ISO/TC60/WG6“直齿与斜齿圆柱齿轮胶合承载能力计算原理”。

在ISO/TC60/WG6“计算原理”中，包括两种计算方法，即H·BLOK的闪温准则和G·Niemann等人的积分温度准则。对这两种方法，各国是有不同倾向的，以美国、苏联、日本及瑞士等国为主，明显倾向闪温准则，而联邦德国则倾向积分温度准则并被确定为联邦德国国家标准。我国齿轮界也是有不同倾向的，但为便于不同行业根据自己的实际情况运用和判断选择，本书对两种准则都进行了介绍，并采用最优化设计，给出了不同方法所得到的选参曲线封闭图和新的计算公式。

在研究与运用ISO齿轮胶合计算原理时，读者将会发现，它们还存在一些严重的缺陷，即两种准则都只是一种校核形式，只能用来校核已完成几何设计的齿轮的胶合强度安全系数，无法在设计一开始即按预期抗胶合性能优选某些几何参数，以获得最佳设计方案。其次，它们的计算公式都很繁琐复杂，计算工作量很大，如果变换参数设计时对其设计的取值范围进行比较的话，那就更加困难，甚至根本无法进行。当然，在这种情况下可以采用计算机，这就涉及到有无计算机和是否熟悉程序设计的问题。实

际上，即使应用计算机，经过编程、穿孔及调试修改，所用的辅助时间也是很大的。上述存在的问题使“计算原理”的实用性受到了极大的限制，特别是无法用来提高胶合承载能力问题是需要解决的一个关键课题。为此，本书在以下几个方面对原“计算原理”进行了探讨：

1. 根据摩擦学原理和齿轮啮合几何学，探讨选择并调整一些几何参数以得到最佳设计方案，通过最优化方法对这些参数进行综合，以得到这些参数间的最佳组合关系和数值，以便在设计工作的开始即能加以利用；

2. 绘制出选择最佳设计参数所必需的一系列图表曲线及所对应的数据，以方便设计；

3. 推导出简洁的计算公式，以方便和减小计算工作量和时间，便于在参数值不同时进行方案比较。

以上内容系本书的重点，将在这一部分中加以详细的论述。为了保持系统性和清楚起见，将对两种准则分别加以讨论，并将重点放在BLOK闪温准则上，因为弄清BLOK闪温法，积分温度法也就容易掌握了。

在第三章中，列举了一些应用实例，可以帮助读者更好的掌握本书所介绍的内容。考虑到有时会需要对正在应用的齿轮进行胶合强度校核，而应用原计算公式又很复杂，所以在第三章中还给出了通用的校核计算程序，但对新设计的齿轮，由于全部优化结果已由书中曲线封闭图给出，再加上本书给出的简化计算公式实际上就相当于一部“特定功能”的计算机，所以书中不再赘列优化设计的源程序。

最后还应说明，提高齿轮胶合承载能力的途径是很多的，例如优选配偶材料与良好的热处理工艺，提高齿轮加工精度和齿面粗糙度，合理的润滑方式及油品，特别是使用良好的润滑油添加剂以及恰当的修形，效果更是显著。但也应当看到，以上措施常常是一些非稳定因素，经常会由于产品种类、操作者与检查人员的不同而在质量上有较大的差异，因而在抗胶合性能上也带来较

大的不同。至于添加剂，由于质量尚未过关，抗胶合性能较好的添加剂却常常是腐蚀性很大的，虽然提高了抗胶合性能，却带来了更为强烈的腐蚀磨损问题，以致很多部门不敢加以采用。由于以上原因，作者认为：最根本而又有效的措施应该是几何设计的方法，所以本书就是从设计角度来研究提高抗胶合性能的。当然，在优化设计的基础上，如果同时考虑上述的各种措施，无疑将会锦上添花，因此，在采用本书基本几何参数优化设计的同时，也希望大家进行包括材料、加工工艺及维护的全面优化，以达到最为完善的结果。

第一章 BLOK闪温法的优化设计与计算

§ 1—1 闪温法发展简介

以温度做为计算准则的ISO/TC60/WG6齿轮胶合计算原理，包括两种不同的计算方法，即布洛克闪温准则和积分温度准则。下面，首先介绍布洛克闪温准则。

一般认为，如能保证齿面间为完全的液体润滑状态，齿面就不会发生胶合。但由于齿轮传动经常是工作在频繁的起动、变速与停车情况下，工作中振动强烈，齿面间滑动速度在节点两边变换方向，啮入啮出时边界条件极差，以及边缘冲击，故齿轮基本上是处在边界润滑状态下。这样，当齿间载荷过大，润滑方法不良或供油不足，齿面粗糙度不高以及相对滑动过大时，就将进一步破坏边界润滑而发生两齿面间金属的直接接触，这就使摩擦热剧增，齿面瞬时温度过高，产生齿面间的胶合。

布洛克闪温准则认为：对于特定的齿轮副材料及润滑剂，存在一个临界温度，当一对轮齿接触点处的瞬时接触温度（总温度）超过这一临界温度后，齿面间就要发生胶合。该法还规定，此瞬时接触温度系由两部分所组成，即齿轮本体温度与瞬时闪温。

布洛克闪温原理是由 H. BLOK 于 1937 年提出来的，原始的布洛克闪光温度 (*flash temperature*) 公式为：

$$T_f = 0.83 \frac{\mu W_N (v_1 - v_2)}{(k_1 \sqrt{v_1} + k_2 \sqrt{v_2}) \sqrt{b}}$$

式中 μ ——摩擦系数；

W_N ——单位齿宽上的法向载荷；

$2b$ ——接触宽度；

$v_{1,2}$ ——主、从动齿轮的切线速度；

$k_{1,2}$ ——计算系数，其计算式为：

$$k_1 = \sqrt{c_1 \gamma_1 \lambda_1}$$

$$k_2 = \sqrt{c_2 \gamma_2 \lambda_2}$$

其中 C ——比热；

γ ——密度；

λ ——导热系数。

由闪光温度公式可以看出，很多影响温度的因素尚未加以考虑，故公式有一定的近似性。后来很多学者对这个公式进行了不断的补充和修改，其发展过程简介如下：

凯利 (B·W·Kelly) 于1952年运用布洛克闪光温度公式计算出轮体本体温度，并进一步考虑了粗糙度的影响，导出如下公式：

$$T_t = \left[T_1 + 0.00317 \frac{W_N (v_1 - v_2)}{(\sqrt{v_1} + \sqrt{v_2}) \sqrt{b}} \right] \frac{55}{55 - s}$$

式中 T_1 ——本体温度；

s ——表面平直度的均方根值，凯利和 AGMA 标准都是指跑合后的齿面粗糙度。

由于凯利是通过齿轮及滚子对粗糙度的影响进行试验的，而且是从试验结果的分析中得到齿面粗糙度与齿面接触温度间关系的，因而是一个经验公式。但后来的试验证明，在一定的粗糙度范围内，公式与试验结果是非常吻合的，所以布洛克曾给予很好的评价。

达德雷 (D·W·Dudley) 又进一步将凯利公式加以改进，将其公式中的载荷修正为实际载荷，得到以下计算公式：

$$T_t = \left[T_1 + \frac{C_f f W_t k_e (v_1 - v_2)}{\cos \phi_t F_e K_e C_v (\sqrt{v_1} + \sqrt{v_2}) \sqrt{B_e/2}} \right] \frac{55}{55 - s}$$

式中 C_f ——材料系数；

f ——摩擦系数，一般可取0.06；

W_t ——齿轮圆周力；

- F_e ——有效齿宽；
 k_e ——载荷分布系数；
 K_o ——使用系数；
 C_o ——速度系数；
 B_e ——接触宽度。

1965年，美国齿轮制造者协会以达德雷公式为基础，并进一步发展创新，制订了AGMA217.01齿轮胶合计算标准，其瞬时温度公式为：

$$T_f = T_o + \left[\frac{W_{te}}{F_e} \right]^{3/4} \left[\frac{Z_p n_p^{1/2}}{P_d^{1/4}} \right] \left[\frac{50}{50 - s} \right]$$

式中 T_o ——供油温度；

W_{te} ——实际作用的圆周力；

n_p ——小齿轮转数；

p_d ——径节；

Z_p ——几何计算系数。

此后，布洛克闪温公式又经各国齿轮研究者的继续修改和补充，终于形成今日的形式，即后面将介绍的公式（1—1）～（1—12），并由瑞士和荷兰做为齿轮胶合国际标准向ISO提出，最后在1975年12月被ISO批准试行。由于该理论与计算公式经过了这样长的历史变革，经过美国航天工业近二十年的实际运用的考验〔24〕*，近些年又经日本学者做了大量的试验验证〔13〕、〔14〕，因而证实了它也是比较成熟和符合客观规律的，所以受到了世界很多国家的肯定。

以下对做为国际试行标准的布洛克闪温准则做一简要介绍。

如上所述，闪温准则认为：齿面间强烈摩擦所引起的瞬时接触温度系由两部分所组成，即轮体本体温度及闪温。要保证齿面不发生胶合失效，齿面间瞬时接触温度 θ_B 必须小于胶合极限温度 θ_S ，即

$$\theta_B = \theta_M + \theta_{fla} < \theta_S \quad (1-1)$$

* 见书后参考文献，下同