

• 研究简报 •

22

124-128

牵引传动理论研究的现状

Theoretical Study on Traction Drives

TH139

汪海云
Wang Haiyun

何小柏
He Xiaobai

(重庆大学机械工程一系, 重庆, 630044)

A 摘要 介绍了一种新型传动——牵引传动 (traction drives), 并对其理论研究的现状进行了综述。

关键词 传动; 牵引传动; 弹性流体动力润滑
中国图书资料分类法分类号 TH139

本构模型,
弹性流体润滑, 机械传动,

ABSTRACT The authors introduce a new type of drives——traction drives, and summarize the present situation of theoretical study on traction drives.

KEYWORDS drive; traction drive; elastohydrodynamic lubrication

0 牵引传动原理及应用

牵引传动 (Traction Drives) 是近几十年来得以迅猛发展的一种新型传动方式。图 1 可反映出牵引传动的基本原理: 两个承受高压的相对滚动且具有一定表面弹性的滚动体之间, 存在着一液态的具有高剪切特性的传动介质, 借助存在于滚动体之间的流体间的剪切应力, 实现两运动表面间的运动和动力传递。

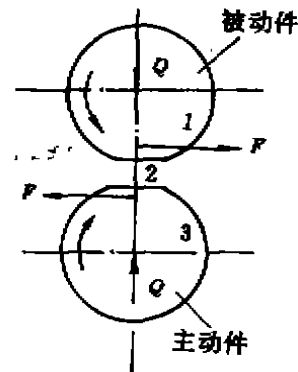


图 1 牵引传动基本示意图
1, 3——滚动体 2——牵引流体

由于牵引传动中动力的传递是在两个光滑的滚动体之间, 且被一层很薄的剪切油膜所隔开, 所以牵引传动能够非常稳定地实现传动比的连续变化, 并且由于避免了滚动体的直接接触, 因而可实现无噪声、平稳的动力传动, 同时, 存在于滚动体之间的油膜, 又能有效地减低滚动体的磨损和减缓振动。根据牵引传动理论制成的牵引传动减速器等设备已在纺织、汽车工业等领域得到应用^[1, 2, 15, 21, 22, 28], 据介绍^[8, 23]美国 NASA 所属的 Lewis 研究中心曾用牵引传动原理设计并制造了航空发动机用减速器。

1 牵引传动理论研究的由来

摩擦传动是牵引传动的摇篮。1886 年,雷诺的流体动压润滑理论问世,为很好地解决在摩擦传动中摩擦和润滑的矛盾提供了有力的理论工具,导出了著名的雷诺方程。一百多年来,人们以这一方程为基础,成功地解决了滑动轴承的动压润滑等一系列润滑问题。

弹性流体动力润滑(EHL)理论(以下简称弹流理论)是近代润滑理论发展出的新成果,而牵引传动的理论又是脱胎于弹流理论。弹流理论从出现到现在,对“理想模型”——指光滑体、稳态、等温、牛顿流体的弹流问题进行了广泛、深入的研究,并出现了各种各样的数值计算方法^[16,18],得出了众多的弹流油膜厚度的公式。这些结论和实验结果大多能吻合。因此,可以认为,理想弹流模型的油膜厚度问题已基本得到解决。与此同时,理想弹流模型的牵引力问题却遇到了很大的困难^[4]。一方面,牛顿流体模型算出的摩擦牵引力和实验值相差甚远;另一方面,从牛顿流体模型看流体力学性质几乎完全相同的两种牵引流体,在相同的工况条件下测出的摩擦牵引力相差竟有几个数量级,用牛顿流体理论来解决这些现象,已显得无能为力了。于是,很多学者都认为:对于弹流牵引力问题,应从牵引流体的非牛顿流体粘性方面加以深入研究^[5,17,19,20]。

随着弹流理论的日益完善,对牵引传动的理论分析也取得了众多的成就,有关其技术参数的求解方法归纳起来大致有以下几种:

- 1) 利用弹流润滑理论,即用雷诺方程、能量方程、本构方程联立求解^[6,6];
- 2) 对牵引传动过程中的能量转化进行简化分析,借助于能量方程和传统的力学本构方程求解^[7];
- 3) 利用实验数据建立流变力学模型,在此基础上进行求解^[9]。

对于牵引传动的理论研究工作,主要集中在对牵引流体的牵引特性的研究方面。

2 牵引传动理论研究的内容

1955 年 Clark 等人^[9]在实验中观察到,处于高压状态下的牵引(润滑)流体,当其受的剪应变率达到一定值以后,会出现屈服现象,也就是说,在高压、高剪切率的情况下,牵引流体呈现出了塑性固体的剪切特性。同时,从当时实验中得出的关于弹流接触区的润滑油膜厚度,和直接从弹流理论中推出的结论相吻合,而从实验中得出的牵引力、牵引系数(F/P)却比由理论推算出的小得多,在重载、

中等滑动速度的情况下,这种现象更加明显。针对这些现象,人们经过几年的研究一致认为:在高压弹流接触中,流体已经不是牛顿流体而应该呈现为非牛顿流体特性^[5]。

到目前为止,已提出的牵引传动非牛顿流体模型可分为五种类型:

- 1) 临界剪应力假说^[10]

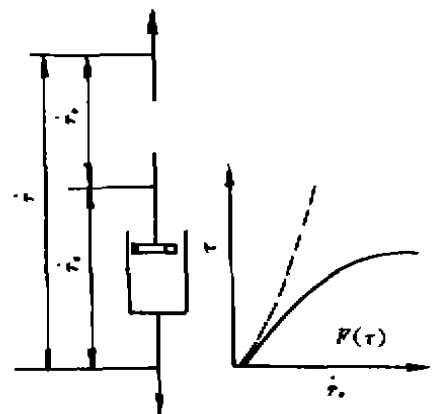


图 2 非线性粘-弹图

该假说认为:在某一临界剪应力下,流体呈牛顿特性,而当剪应力达到或超过某一极限值后,流体就不再遵循牛顿流体理论,而是表现出非牛顿流体的特性。提出这一假设的学者研究了牵引曲线中非线性部分的粘弹性,得出了很简单的非线性本构方程,他们认为:总的剪应变率 $\dot{\gamma}$ 是线性的弹性剪应变率 $\dot{\gamma}_e$ 和非线性的粘性剪应变率 $\dot{\gamma}_v$ 之和,如图 2 所示。

即

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_e + \dot{\gamma}_v = \frac{1}{G} \cdot \frac{d\tau}{dt} + F(\tau) \quad (1)$$

式中 $F(\tau)$ ——非线性粘性函数。

2) 流动状态的热力学理论^[11]

这种理论是把剪应力和剪应变率的关系作为主要变元的能障理论。它认为:流体分子的移动是当分子从它的亚晶体结构的平衡位置向它附近的“空间”里移动时发生的,这是一个激发过程,在移动时,分子必须具有足够的能量来克服遇到的能障,在没有外力作用时,在一个方向上能够克服能障而移动的分子数目恰好等于相反方向上移动的分子数目,所以没有净流动。当给流体施加剪应力后,沿剪应力方向上的能障有所减小,减小的数量等于分子在剪应力作用下移动时所做的功,在剪应力相反的方向上,能量将增加同一数量。因此,将发生在剪应力方向上的净流动,当剪应力不大时,分子移动的速度与剪应力成正比,当所做的机械功与 $K \cdot T$ 之间 (T, K 分别为绝对温度和波耳兹曼常数) 变成同一数量级时,剪切应变率和剪应力的关系就变成非线性的了。根据热活性理论,该模型具有双曲正弦流体流动关系式,即

$$\dot{\gamma} = \tau_0 \sinh(\tau/\tau_0) \quad (2)$$

式中 η ——小剪应变情况下的粘度;
 τ_0 ——特征(临界)应力。

3) 时间相关粘度假说^[12]

这种理论认为:当给润滑(牵引)流体施加一定的压力时,其粘度会随之增大,但是,实际上并不能在加压的那一瞬间就能立刻达到最终的稳定值,而是存在一个时间滞后,慢慢地增大,经过一段时间以后才达到上述稳定值。而这一滞后的长短,又和压力值的大小有关。其原因在于,对于润滑流体的任何与压力有关的物性参数,其改变过程都是由分子的移动来实现的,这样一种移动速度决非无穷大,因而这一移动过程需要一定的时间才能实现。同时,润滑(牵引)流体的粘度不可能随着压力的增大而无限地增大,而是存在一个极限值。于是流体受压后每一时刻的粘度限定值与时间的关系为

$$\log_{10} \eta_{\infty} = a + b \log_{10} t \quad (3)$$

式中 η_{∞} ——牵引流体在时刻 t 的粘度极限值;

a, b ——与牵引流体有关的常数。

4) 粘 - 弹理论^[7,15]

粘 - 弹理论认为:当 D^* 数较小时,牵引力主要受牵引流体的粘性特性的影响,而弹性效应则可忽略,在小应变率时,为线性粘性体,而在大应变率下则成为非线性粘性体;反之,当 D 数较大时,牵引流体则成为粘 - 弹性体。

5) 粘 - 弹 - 塑理论^[14]

牵引流体在高压下将产生玻璃体转换。该理论认为:在液体状态下,剪切流变特性可看成是典型的粘性流体,即使处于高剪应变率状态下,亦可将其视为粘弹性体。但当其进入固体区域后,小剪应变率的状态下,其弹性特性就具有极限,(即存在极限剪切应力和临界剪应变值),在靠近液 - 固转换点附近的区域内,流体可看成是粘、弹、塑特性的一个复杂组合,于是得到本构方程:

$$\dot{\tau} = \dot{\tau}_e + \dot{\tau}_p \quad (4)$$

$$\text{即} \quad \dot{\tau} = \dot{\tau} - \ln(1 - \dot{\tau}) \quad (5)$$

其中 $\dot{\tau}$ —— 总剪应变率;
 $\dot{\tau}_e$ —— 弹性剪应变率;
 $\dot{\tau}_p$ —— 粘、塑性剪应变率;
 τ —— 剪应力

在各种模型状态下,根据本文提到的求解方法即可求解相应的本构方程,实现对牵引传动各参数在一定精度内的近似理论计算。笔者运用粘 - 弹 - 塑理论,设计制造了牵引传动减速器,在实验中证实了粘 - 弹 - 塑理论。

3 结束语

正确的牵引传动本构模型的建立是牵引传动理论的关键,而牵引传动理论则是解决牵引传动实践应用问题的前提,以上谈到的几种模型在一定程度上揭示了牵引传动的客观规律,但至今牵引传动的机理尚未被我们完全地认识。在牵引传动这个广阔的学科领域中,本构模型的研究是它的核心,是主干。可以这样说:基础理论是主干扎根生长的土壤和水分,自然科学是它生长的阳光和空气,弹流动力润滑理论、热力学理论等等,是使这根主干生长强壮的营养素。

* 在牵引传动理论中,粘度 η 与剪切模量 G 之比叫做松弛时间,而松弛时间 (η/G) 与流体通过接触区的时间之比称为 *Deborah* 数(简称 D 数)。

参 考 文 献

- 1 Heilich F W, Shube E. Traction on Drive. 11~12
- 2 Machine Design. 1974; 101~131, 149~160
- 3 Aviation Week Space Technology, 20. 7. 1981, 168~173
- 4 杨佩然. 弹性流体动力润滑理论的回顾与展望——纪念润滑理论的基本方程. 润滑与密封, 1986, 34~40
- 5 Cheng H s. A refined solution to the thermal-elastohydrodynamic Lubrication of rolling and sliding cylinders. ASME transaction. 1965, 113, 214~243
- 6 温诗铸. 摩擦学原理. 清华大学出版社, 1990, 18~33, 99~108
- 7 Johnson K L, Tevearward J T. Shear behaviour of Elastohydrodynamic oil film. Proc. R. Soc. Lond, 1977, 356, 535~537
- 8 Scott Bair, Winer W O. A rheological model of elastohydrodynamic contacts based on primary laboratory data. Transaction of ASME, July, 1979, 101;
- 9 Chark O H, woods W W, White J R. Lubrication at extrema pressure with Mineral oil film. Journal of Appl Phys, 1951, 22(4), 238~257
- 10 Doyson A. Frictional Traction and Lubricant Rheology in Elastohydrodynamic Lubrication. Phil Trans Royal Society(London) Series A, 1970, 266, 242~260
- 11 张英杰. 大滑动速度下弹流接触线的摩擦问题. 机械工程学报, 1984, 20(4), 42~46
- 12 Paul G. Transaction of the ASME. 19; 17~32
- 13 Tevearward J L, Johnson K L. The Influence of Fluid Rheology on the Performance of Traction Drives. Transaction of the ASME. Journal of Lubrication Technology, 1979, 101; 170~178
- 14 Scott Bair, Winer W O. Trans of the ASME. Journal of Lubri. Tech, 1979, 101, 429~513
- 15 陈仕贤. 对称微锥封闭加压式附着传动无声减速器. 专利号 CN86107997A, 1986
- 16 Hsu C H and Lee R T. Advanced multilevel Solution for Elastohydrodynamic Lubrication Circular Contact Problem, Wear, 1994, 177, 117~121
- 17 吴性良. 弹性线接触下牵引传动的非牛顿流体效应. 北京航空学院科研报告. BH-B2368, 1986
- 18 Wolff R and Kubo A. The Application of Iveton-Raphson method to thermal elastohydrodynamic lubrication of line contacts, Transactions of th ASME, Journal of tribology, 1994, 116, 323~327
- 19 Hsing Sen, S Hsiao. Non-Newtonian and Thermal Effects on film generation and traction Eeduction in EHL line contact conjunctions, Transactions of the ASME, Journal of Tribology, 1994, 121; 559~569
- 20 (日)村木正芳. 润滑油のトテクシン特性に ちす研究(第 1, 2, 3 报), 非线性粘弾性モデルにすトテクシンの 解析, 滑, 第 28 卷, 第 10 号, 1989
- 21 (日)森口义文. 星ク-テ式 力 送装置, 公开特许公报, 昭 59-17057, 1984
- 22 (日)中关昌入, トテクシントモクブ装置, 公开特许公报, 照 59-190558, 1984
- 23 严升明, 董志峰. 牵引传动的新理论及其在无级变速器中的应用. 中国机械工程学会机械传动分会无级变速器专委会, 1992, 3~5, 9~12