

机械设计课程中“带传动设计” 部分的教学方法探讨

安琦,王建文,殷勇辉,李正美

(华东理工大学机械与动力工程学院,上海 200237)

[摘要]带传动是最为典型的摩擦传动,带传动设计在机械设计课程教学中占有重要地位。作者根据多年的教学实践,对带传动设计部分的教学困难和教学目标及内在的教学逻辑进行了思考与总结;按照知识体系的理解顺序,将授课逻辑分为8个部分,并对每个部分的授课方法进行了归纳;对“带传动的受力分析”和“带传动的弹性滑动和打滑”两个较难知识点的授课过程进行了示范性说明,指出了教学过程中的注意事项。相关分析可为机械设计课程中带传动设计部分的教学提供借鉴和参考。

[关键词]带传动;教学目标;教学逻辑;难点分析

Discussion of Teaching Method for Belt Driving in the Course of Mechanical Design

An Qi, Wang Jianwen, Yin Yonghui, Li Zhengmei

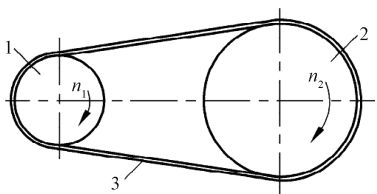
(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and
Technology, Shanghai 200237)

Abstract: Belt driving is a kind of typical drivings. The teaching of the belt driving plays a important role in the course of mechanical design. According to many years' teaching experience, the authors explain the difficulty and target of teaching for the belt driving, and analyze the teaching logics. Based on the understanding process of the belt driving mechanism, the teaching contents are divided into 8 logics parts, and the teaching method for each part are summarized. The authors also take the two difficult teaching points of "force analysis of belt driving" and "slippage and elastic slippage of belt driving" as examples to analyze the teaching method and point out the matters needing attention when teaching. This paper can provide reference for the course teaching of mechanical design.

Key words: Belt driving; Teaching target; Teaching logics; Analysis of difficult teaching point

带传动是一种十分重要的传动形式,带传动设备结构并不复杂,在机械装备中应用较多。从家用电器中的洗衣机、收音机、农用抽水机到汽车发动机中的皮带系统,都涉及带传动过程。

皮带传动是摩擦传动的一种最典型形式,也是应用最广泛的一种传动形式,具有显著的代表性。带传动是两个或多个带轮之间用带作为挠性拉曳元件的传动。图1所示为皮带传动的原理图,传动过程涉及主动轮、从动轮和带三部分。当原动机驱动主动轮转动时,带和带轮之间的摩擦(或啮合)力会拖动从动轮转动,从而传递运动和动力。



1.小皮带轮(主动轮) 2.大皮带轮(从动轮) 3.皮带

图1 带传动原理图

机械设计课程一般安排在大学三年级进行。学生在生活中都见过皮带传动,因此对带传动设计的内容并不感到陌生。但即便如此,这部分内容的教学仍面临一些困难。第一,皮带传动属于典型的摩擦传动,其传动过程的力学分析是一个难点,主要体现在皮带绕过带轮时的力学模型构建及力学参数的计算方法推导。这一过程主要涉及动态欧拉公式的推导及利用该公式建立皮带受力的计算方法。第二,皮带传动存在弹性滑动现象,会导致速度发生变化。教学中如何解释清楚这种速度变化是一个难点,其核心是对弹性滑动过程的讲解。第三,皮带传动的设计过程并不复杂,但如何在讲解过程中将皮带传动的失效形式、皮带选型、主要结构参数的确定等内容串联起来,形成便于学生接受和掌握的知识体系,是一个难点。

可见,对于皮带传动内容,教学中要真正构建出一个合理的教学逻辑和教学方法是具有难度的。作者通过长期的教学思考和实践,以提高实际教学效果为根本目标,针对皮带传动的教学内容,形

成了自己的教学方法,在此与同行交流。

一、带传动设计部分的教学逻辑构建

教师在讲解前应先确定教学目标。带传动设计部分的教学目标是:使学生掌握带传动的优缺点、常用型号、应用范围、常见类型、结构构成;掌握弹性滑动产生的根本原因、皮带绕过带轮一圈速度变化的规律、传动比和滑动率的计算方法;掌握带传动工作拉力、离心拉力、弯曲应力及轴上载荷的计算方法;掌握带传动的主要失效形式、计算准则、主要参数的确定方法、参数大小对性能的影响过程;掌握带传动的设计过程和步骤,弄清带轮的结构特点、带传动的空间布置方法、张紧方法。

教学逻辑是教学过程的关键,好的教学逻辑可以让学生循序渐进地理解和掌握知识点。根据教学目标,作者构建了带传动设计部分的教学逻辑。

(一)讲解带传动的优缺点

带传动的优缺点是通过与齿轮传动相比较而得出的。带传动是典型的摩擦传动,而齿轮传动是一种典型的啮合传动。通过比较讲解,学生不仅可以掌握皮带传动的优缺点,而且可以对齿轮传动的优缺点形成初步的认识,为后续学习齿轮传动打下基础。除讲解带传动优缺点外,教师还要特别向学生讲解带传动一般为何放在高速级的原因。

(二)讲解皮带传动的分类及型号

带传动分为平带传动、V带传动、多楔带传动和同步带传动,其中V带和平带传动应用最广。教师要讲清楚平带和V带应用中的不同点,如V带的传动能力大,中心距可以较短,可以多根应用,但成本较高,无法实现交叉和半交叉传动。另外,V带和窄V带的区别及型号品种、V带的截面形状及截面的几何分区、V带带轮和平带带轮的一般结构及其异同点、常用的材料、平带带轮表面存在凸度的原因等也要讲清楚。

(三)讲解皮带传动的几何计算

带传动的几何计算就是带长的计算方法。图2所示为带传动的几何关系图,以平带传动为原型推导出带长的计算公式为:

$$L = \frac{\pi(D_2 + D_1)}{2} + \gamma \frac{D_2 - D_1}{2} + 2a \cos \frac{\gamma}{2} \approx \pi D_m + 2a + \frac{\Delta^2}{a} \quad (1)$$

式(1)也适用于 V 带传动。推导过程要详细,力争使学生掌握带长的计算方法,对皮带传动的中心距 a 、包角 α_1 、带轮直径 D_1 和 D_2 等形成深刻的认识,并能够独立完成推导过程。

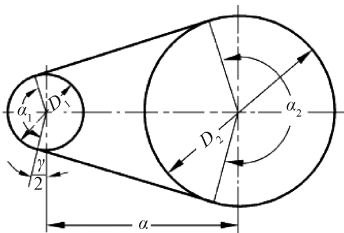


图 2 带传动的几何关系

(四)讲解皮带传动的受力分析

受力分析是皮带传动的核心内容,教师先要通过示意图说明皮带安装后处于静止状态时的力学关系,然后解释皮带在主动轮的带动下如何转动,紧边和松边的受力如何变化;接着对主动轮(一般是小轮)进行力学分析,推导出欧拉公式,并举例说明其应用,让学生产生深刻的印象。在介绍欧拉公式的过程中,教师还要将其与普通物理课程中的欧拉公式进行对比,指出两者的异同点。最后,教师推导出皮带传动的紧边、松边的受力计算表达式,要求每个学生在理解的基础上记忆并牢固掌握。

(五)讲解皮带传动的弹性滑动和打滑现象

教师可以先在黑板上画出皮带绕过小皮带轮的示意图,从紧边受力 F_1 大于松边受力 F_2 谈起,深入讲解皮带与带轮之间的摩擦力和皮带回缩力之间的平衡关系。在开始阶段,这种平衡可以维持,但随着弧长的增加,摩擦力不足以维持这种平衡,因此存在一个临界点。超过临界点,皮带和皮带轮之间将产生相对滑动。这就是静弧(α'')和滑动弧(α')。随着载荷增加,滑动弧逐渐增大而静弧则不断减小,当滑动角 α' 增大到包角 α 时,系统达到极限状态,带传动的有效拉力最大,之后带就开始打滑。打滑是一种失效,将造成带的严重磨损并使带的运动处于不稳定状态。打

滑可以避免,但弹性滑动不能避免。教师要详细讲解这部分内容,并介绍打滑和弹性滑动的危害,以及如何在设计中避免打滑现象发生。

(六)讲解皮带传动的计算准则及疲劳强度计算

不同于其他零部件,皮带传动的计算准则可总结为一句话:在不打滑的前提下具有一定的疲劳强度和寿命。皮带传动的失效有两种:一是打滑,二是皮带的疲劳断裂。打滑与否是由传递的载荷、包角、张紧力决定的,无法用计算公式表达。但皮带的疲劳强度和寿命可以用公式表达,即: $\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_{b1} \leq [\sigma]$,由此得出皮带传递功率的计算公式:

$$\begin{aligned} P &= \frac{Fv}{1000} = \frac{(F_1 - qv^2) \left(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha}}\right) v}{1000} \\ &= \frac{(\sigma_1 A - qv^2) \left(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha}}\right) v}{1000} \\ &= \frac{([\sigma] - \sigma_{b1} - \sigma_c) A \left(1 - \frac{1}{e^{\mu\alpha}}\right) v}{1000} \end{aligned} \quad (2)$$

传递功率 P 的单位为千瓦。利用式(2),教师就可以解释速度 v 、包角 α 、皮带线密度 q 等参数大小变化对皮带传递功率的影响了。

(七)讲解提高皮带传动能力的方法

皮带传动是一种标准化程度较高的传动形式,教师不仅要让学生学会设计,而且要让学生知道如何提高皮带的传动能力。在讲解这部分内容时,教师应该结合示意图,说明传动能力主要由哪几个参数决定,这些参数包括摩擦系数、包角、张紧力、速度、材料强度等。摩擦系数一般取决于材料的性质,在材料一定的情况下,采用 V 形带传动、多楔带传动、增加摩擦面积、改变表面粗糙度等方式可以改变摩擦系数。包角的大小在传动比一定的情况下是确定的,增加张紧轮的方式可以用来增加包角,但会使皮带弯曲增加一次,降低疲劳寿命。机械装置应尽可能在最佳速度下工作,而使用新材料可以进一步增加初始的张紧力。总之,在讲解如何提高皮带的传动能力时,教师一定

要告诉学生,任何方法都不是万能的,都会受到边界限制,因此设计时应综合考虑各种因素的影响,寻找最优方案。

(八)讲解皮带传动的设计过程及参数确定方法

皮带传动内容的教学旨在使学生掌握皮带传动的设计方法。教师应该先告诉学生实际设计中的已知条件和设计的目标,然后介绍设计过程及设计步骤。一般而言,皮带设计之初的已知条件包括电机功率、转速、工作机转速、中心距允许范围等,而设计目标是确定带的型号、带轮直径、带长、皮带根数、轴上的载荷、带轮的结构。基于设计目标,一般的设计过程为:1.确定带的型号,即完成计算功率 P_c 计算,通过手册查取型号;2.确定带轮的基准直径,即通过手册中该型号皮带的最小带轮直径确定本次设计的小带轮直径 D_1 ,然后根据传动比计算大带轮直径 D_2 ;3.计算带长、中心距、包角,即根据初取中心距计算带长,再根据计算带长查手册选择标准带长 L_d ,根据标准带长计算实际中心距,然后计算出小带轮包角,并验算是否满足要求;4.确定带的根数,即根据手册查取的单根带传递功率 P_0 和 ΔP_0 ,利用公式计算带的根数,并验算是否在许用范围;5.求轴上载荷,即根据公式计算带的张紧力,然后计算轴上的载荷;6.确定带轮的结构,即根据大小带轮的直径进行带轮的结构设计,绘制出零件图。上述教学过程一定要配合设计例题展开,以进一步强化教学效果。

二、带传动设计部分重点内容的教学方法

带传动部分的教学重点和难点内容包括带传动的力学性能分析、带传动的弹性滑动和打滑。为了提高教学效果,作者采用了以下教学方法讲解重点和难点内容。

(一)带传动受力分析的教学方法

当皮带绕过带轮时,皮带与带轮之间存在较为复杂的力学变化关系。在讲解时,教师一定要抓住带轮从预紧开始到皮带正常转动的过程进行分析,引导学生循序渐进地理解。

图3所示为带轮装配后的小带轮受力情况,这时紧边和松边的力一样大,均为 F_0 。工作起来,主动轮转动带动从动轮,带与轮面间的摩擦力使其一边拉力增大到 F_1 ,称为紧边拉力,另一边拉力减小到 F_2 ,称为松边拉力。两者之差 $F = F_1 - F_2$ 即为带的有效拉力,它等于沿带轮的接触弧上摩擦力的总和。这个工作拉力可以通过功率和速度计算出来,即

$$F = F_1 - F_2 = \frac{1000P}{v} \quad (3)$$

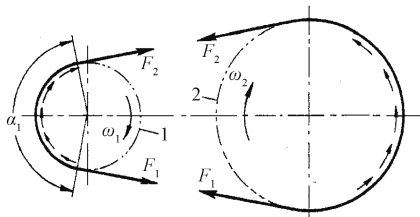


图3 带轮受力示意图

如果近似认为带工作时的总长度不变,则带的紧边拉力的增量应等于松边拉力的减量,即

$$F_1 - F_0 = F_0 - F_2 \Rightarrow F_1 + F_2 = 2F_0 \quad (4)$$

将式(4)与式(3)联立整理,可以得到

$$F_1 = F_0 + \frac{F}{2} \quad (5)$$

$$F_2 = F_0 - \frac{F}{2}$$

接下来教学的关键是 F_1 和 F_2 的关系,即讲清楚欧拉方程的推导过程。学生在普通物理课程中已经学过欧拉方程,但物理课程中的欧拉方程是一个静力学的欧拉方程,而带传动中用到的欧拉方程是动态的,包含离心力。讲清楚这一点,学生理解起来就容易了。

图4是皮带绕过带轮的力学分析图。取一微段带进行力学分析,可列出皮带开始打滑时带上各力沿垂直方向的平衡式为

$$F \sin \frac{d\alpha}{2} + (F + dF) \sin \frac{d\alpha}{2} - dF_N - dF_{NC} = 0 \quad (6)$$

式中 dF_N 为微段带的正压力, dF 为紧边拉力增量,它等于作用在微段带上的摩擦力。用 $\frac{d\alpha}{2}$ 代替 $\sin \frac{d\alpha}{2}$, 略去 $dF d\alpha$, 可得

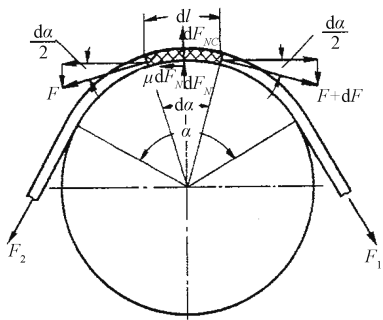


图4 带绕过带轮的力学模型

$$dF_N = F d\alpha - dF_{NC} \quad (7)$$

求解方程(4)的关键是要把微段带的离心力建立计算模型。图5所示为这个微元体的离心力分析模型图。

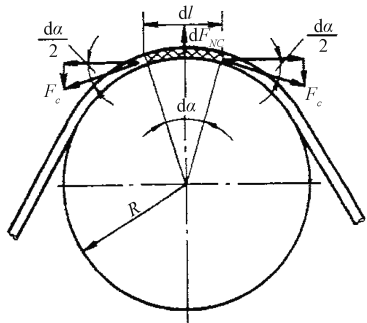


图5 离心力产生模型

根据图5,即可写出平衡关系式

$$q(R d\alpha) \frac{v^2}{R} = 2F_c \sin \frac{d\alpha}{2} \quad (8)$$

当 $d\alpha$ 很小时, $\sin \frac{d\alpha}{2} \approx \frac{d\alpha}{2}$, 则有

$$F_c = qv^2 \quad (9)$$

因此有

$$dF_{NC} = qv^2 d\alpha \quad (10)$$

这样方程(7)就可以写成 $dF_N = (F - qv^2) d\alpha$ 。

微段带的摩擦力可以写成

$$dF = \mu dF_N = \mu (F - qv^2) d\alpha \quad (11)$$

对式(11)分别在 F_1 到 F_2 和 0 到 α 范围内积分, 即可得

$$\frac{F_1 - qv^2}{F_2 - qv^2} = e^{\mu\alpha} \quad (12)$$

式中 e 为自然对数的底; μ 为带与带轮间的摩擦系数, 对于 V 带传动, μ 应为当量摩擦系数 μ_v ; α 为带在带轮上的包角; q 为每米带长的质量, 单位为 kg/m 。

式(12)就是带绕过带轮的力学计算公式, 也称为动态欧拉公式。教师在教学过程中必须告诉学生, 这是一个近似的公式, 其推导前提是没有考虑摩擦系数的变化, 并认为皮带与带轮之间是相对静止的贴合关系。

将式(11)与式(3)联立, 即可完整得出皮带绕过皮带轮的力学关系为

$$F_1 = \frac{F e^{\mu\alpha}}{e^{\mu\alpha} - 1} + qv^2 \quad (13)$$

$$F_2 = \frac{F}{e^{\mu\alpha} - 1} + qv^2 \quad (14)$$

只有让学生理解整个推导过程, 并记住式(3)和式(12), 他们才能完全掌握整个力学分析过程。

(二) 带传动的弹性滑动和打滑的教学方法

如图6所示, 带自 b 点绕上主动轮时, 带的速度和带轮表面的速度是相等的。但当它沿弧 bc 继续前进时, 带的拉力由 F_1 降至 F_2 , 带的拉伸弹性变形也要相应减小, 亦即带在逐渐缩短。带的速度要落后于带轮, 因此两者之间必然发生相对滑动。同样的现象也发生在从动轮上, 但情况恰好相反。在带绕上从动轮时, 带和带轮具有相同速度, 但带沿前进方向不是缩短而是被拉长, 使带的速度领先于带轮。上述现象称为带的弹性滑动。在讲解过程中, 教师可以将一根橡皮筋绕在圆柱形物体上进行拉动试验, 直观展示这一变化过程。

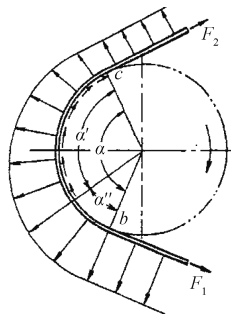


图6 皮带弹性滑动力学示意图

实际工作中, 包角所对应的圆弧可以分为相对滑动(滑动弧)和无相对滑动(静弧)两部分, 两段弧所对应的中心角分别称为滑动角(α')和静角(α'')。静弧总是发生在带进入带轮的这一边上。带不传递载荷时, 滑动角为零; 随着载荷增

加,滑动角逐渐增大而静角则在减小;当滑动角增大到包角时,达到极限状态,带就开始打滑。

弹性滑动会引起下列后果:1.从动轮的圆周速度低于主动轮;2.传动效率降低;3.带磨损;4.带温度升高。

教师特别要告诉学生,弹性滑动与打滑有本质的区别:打滑是一种失效现象,将造成带的严重磨损并使带的运动处于不稳定状态,是可以完全避免的;弹性滑动是一种必然现象,只能减少,不能完全消除。另外,教师还可以补充讲解避免打滑的措施及减少弹性滑动的措施。

三、结束语

带传动作为一种最典型的摩擦传动,其讲解过程有一定难度。本文只是简要介绍了皮带传动设计的教学方法,这部分内容的教学还有很多值得思考的地方:讲解V带带轮的结构时,V带的楔角是 40° ,如何讲解轮槽角一定要小于 40° ;在讲到欧拉公式时,如何讲解这是一个近似公式,但能在皮带传动设计中长期使用;讲到皮带的安装时,如何讲解紧边一般都在下部,但实际使用时也可以违反这一规定;讲到皮带型号的选择时,为何查手册确定的型号可以在实际应用时有所调整,在什么情况下调整,如何调整;讲到带轮表面越粗糙其摩擦力就会越大时,如何理解表面不能太粗糙;讲到平带传动的设计时,如何说明平带传动在工作过程中发出的有节奏的噪声。细节问题看似很小,但授课教师需要开动脑筋,找到

既容易理解、又能让学生牢牢掌握的授课技巧和方法。

在授课过程中,教师还要思考如何借助现代教学手段(多媒体动画演示等)让学生直观了解皮带绕过皮带轮的运动变化和力学性能变化,同时可以设计一些便于课堂演示的小实验,让学生深刻体会皮带传动的细节问题并产生牢固的记忆。

(文字编辑:李丽妍)

参考文献:

- [1] 安琦,顾大强.机械设计[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 安琦,王建文.机械设计课程设计[M].上海:华东理工大学出版社,2012.
- [3] 邱宣怀,郭可谦,吴宗泽,等.机械设计[M].4版.北京:高等教育出版社,1997.
- [4] 濮良贵,纪名刚.机械设计[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [5] 邱宣怀.机械设计学习指导书[M].2版.北京:高等教育出版社,1992.
- [6] 吴宗泽.机械设计[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [7] 安琦.机械设计课程中螺纹联接部分的教学方法探讨[J].化工高等教育,2013(6):79-84.
- [8] 安琦.机械设计课程中“链传动设计”部分的教学方法探讨[J].化工高等教育,2014(6):75-80.
- [9] 安琦,王建文.机械设计课程中“疲劳设计”部分的教学方法探讨[J].化工高等教育,2015(1):81-85.