

磁力金属带传动的传动特性分析

罗善明, 郭迎福, 陈安华, 余以道, 陈立锋

(湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 介绍了磁力金属带传动的工作原理, 分析和探讨了其有效拉力、线速度及弹性滑动率等传动性能, 并通过实验测定了相关性能参数。结果表明, 磁力金属带传动主要是利用磁场吸引力与初拉力的耦合作用来增加摩擦力进而传递运动和动力的, 其传动效率可达95%~98%, 而弹性滑动率一般在0.1%以下。

[关键词] 带传动; 金属带; 磁场吸引力; 机电耦合

[中图分类号] TH132.3+2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0076-05

1 前言

磁力金属带传动 (metal belt drive with magnet, MBDM) 是一种以金属带为挠性元件、依靠磁场吸引力与初拉力的耦合作用来传递运动和动力的新型传动方式^[1,2]。与普通带传动相比^[3-7], MBDM的有效拉力、线速度、传动效率等均有较大幅度的提高, 而弹性滑动率却很小。因而, MBDM可望在要求大功率、高速及精密传动等场合得到推广应用。

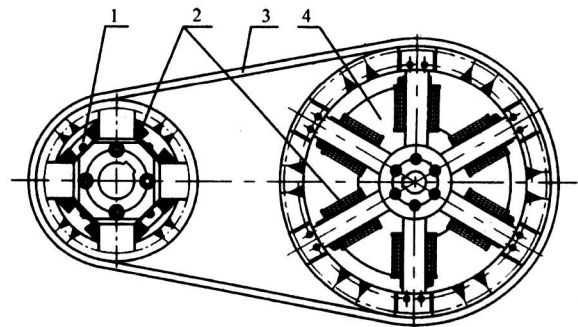
笔者首先介绍了 MBDM 的工作原理, 其次对 MBDM 的有效拉力、线速度、弹性滑动率等性能参数进行分析, 最后通过实验测定弹性滑动率及传动效率等相关性能参数。

2 两种磁力金属带传动比较

根据激磁方式的不同, 可将 MBDM 分为电磁带轮式金属带传动 (metal belt drive with electric magnet, MBDEM) 和永磁带轮式金属带传动 (metal belt drive with permanent magnet, MBDPM) 两类。

1) 电磁带轮式金属带传动 如图 1 所示,

MBDEM 主要由大、小磁力带轮、激磁线圈及金属带等组成, 其特征是: 大小磁力带轮轮辐各缠绕一定匝数的激磁线圈, 通直流电时便可在磁力带轮轮缘上产生磁场, 并吸引金属带, 从而大幅度提高金属带与磁力带轮间的正压力和摩擦力, 进而传递运动和动力。当主动磁力带轮由于驱动力作用而发生运动时, 依靠金属带与磁力带轮之间的摩擦力, 带动从动磁力带轮转动。



1—小带轮, 2—激磁线圈, 3—金属带, 4—大带轮

图 1 电磁带轮式金属带传动

Fig.1 Metal belt drive with electric magnet

大、小磁力带轮均采用轮辐式结构, 轮毂内圈

[收稿日期] 2004-09-06; **修回日期** 2004-11-05

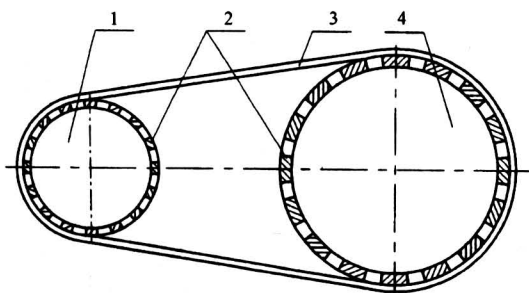
[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50205023), 湖南省教育厅青年基金资助项目 (03B045)

[作者简介] 罗善明 (1968-), 男, 湖南东安县人, 博士, 湖南科技大学教授

为隔磁体，轮毂外圈和轮辐均为导磁体，轮缘则由导磁体和隔磁体相间组成，然后与轮辐固接。磁力线由磁力带轮轮辐、轮缘导磁部分、金属带及轮毂的外圈形成闭合回路，从而产生轮缘向金属带的电磁吸引力。

2) 永磁带轮式金属带传动 MBDPM 的工作原理如图 2 所示，主要由大小磁力带轮、稀土永磁体及金属带组成。安装在大小磁力带轮上的稀土永磁体可产生磁场并吸引金属带，进而传递运动和动力。

MBDEM 的优点是能产生较大的磁感应强度，且便于进行调节，金属带的装拆也较为方便；缺点是磁力带轮的结构较为复杂，同时激磁线圈因产生磁场而附加了部分功率损失。而 MBDPM 则有利于简化磁力带轮结构，提高传动效率，磁场吸引力的分布也更趋均匀。因此，当小带轮直径 $d_1 \leq 180$ mm 时，可采用稀土永磁结构； $d_1 > 180$ mm 时，可采用电磁激磁方式。



1—小带轮，2—稀土永磁体，3—金属带，4—大带轮

图 2 永磁带轮式金属带传动

Fig.2 Metal belt drive with permanent magnet

3 传动特性分析

MBDM 的力学模型如图 3 所示。MBDM 运行过程中，金属带主要承受下列作用力：紧边拉力 F_1 ，松边拉力 F_2 ，带轮支反力 F_n ，离心力 F_c ，磁场吸引力 F_m ，摩擦力 F_f 等。

3.1 有效拉力

如图 3 所示，取一微段金属带 dl 为研究对象，设 F 为金属带的拉力，根据水平方向和垂直方向的平衡可知：

$$\left. \begin{aligned} [(F + dF) - F] \cos \frac{d\alpha}{2} - \mu dF_n &= 0 \\ [(F + dF) + F] \sin \frac{d\alpha}{2} + F_m - F_c - dF_n &= 0 \end{aligned} \right\}$$

用 $\frac{d\alpha}{2}$ 代替 $\sin \frac{d\alpha}{2}$ ，并取 $\cos \frac{d\alpha}{2} = 1$ ，略去二阶无穷小，则上式可简化为

$$dF = \mu(Fd\alpha + F_m - F_c),$$

将 $F_m = kB^2 r_1 b d\alpha$ ， $F_c = \rho_1 v^2 d\alpha$ 代入上式，经整理可得

$$\frac{dF}{F + kB^2 r_1 b - \rho_1 v^2} = \mu d\alpha,$$

上式两边分别在 F_2 到 F_1 和 0 到 α_1 范围内积分，则可得到

$$\frac{F_1 + kB^2 r_1 b - \rho_1 v^2}{F_2 + kB^2 r_1 b - \rho_1 v^2} = e^{\mu\alpha_1} \quad (1)$$

式中 α_1 为金属带在小带轮上的包角； μ 为动摩擦系数； v 为带速； ρ_1 为金属带的线质量； k 为引力系数； B 为磁感应强度； b 为带宽； r_1 为小带轮半径。

式 (1) 即为磁力作用下以金属带为挠性元件的柔性体摩擦传动的欧拉公式。

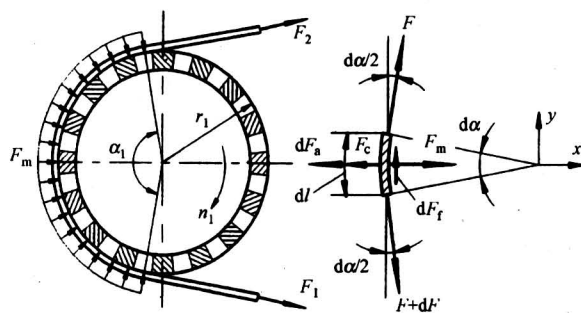


图 3 MBDM 的力学模型

Fig.3 The mechanical model of MBDM

设 F_e 为 MBDM 的有效拉力，则由带传动的基本理论可知：

$$F_e = F_1 - F_2 \quad (2)$$

联立求解式 (1) 和式 (2)，得

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{F_e e^{\mu\alpha_1}}{e^{\mu\alpha} - 1} + \rho_1 v^2 - kB^2 r_1 b \\ F_2 &= \frac{F_e}{e^{\mu\alpha_1} - 1} + \rho_1 v^2 - kB^2 r_1 b \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

设 MBDM 的初拉力为 F_0 ，则

$$F_0 = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (4)$$

联立求解式 (3) 及式 (4) 可得

$$F_e = \frac{2(F_0 - \rho_1 v^2 + kB^2 r_1 b)(e^{\mu\alpha_1} - 1)}{e^{\mu\alpha_1} + 1} \quad (5)$$

由式 (5) 可知，在 MBDM 中，金属带与磁

力带轮间摩擦力的产生已不再是初拉力单独作用,而是磁场吸引力与初拉力耦合作用的结果。显然,由于磁场吸引力的作用,MBDM的有效拉力得到了较大幅度的增加。

3.2 吸引拉力

由于磁场吸引力的作用而在金属带上产生的拉力称为吸引拉力,如图4所示。

列出微段 dl 弧上磁场吸引力 F_m 与金属带的吸引拉力 F_a 的平衡式,有

$$F_m = 2F_a \sin \frac{d\alpha}{2},$$

式中 $F_m = kB^2 r_1 b d\alpha$, 代入上式可得

$$F_a = kB^2 r_1 b \quad (7)$$

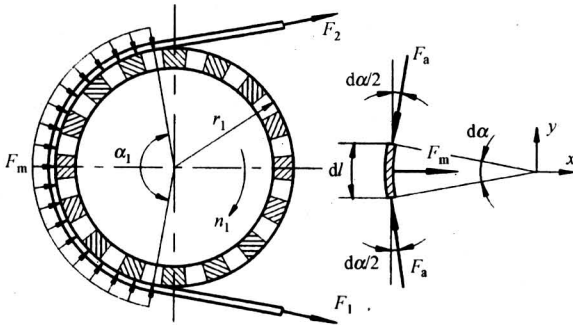


图4 金属带的吸引张力

Fig.4 The attractive tension of metal belt

由图4可知,吸引拉力的方向与弯曲拉力和离心拉力的方向是相反的,可以抵消部分弯曲拉力和离心拉力。因此,金属带上存在的吸引拉力不仅有利于改善金属带的受力状况,降低金属带的最大工作应力,还有利于提高其承载能力和使用寿命。

3.3 最佳线速度

对于具有一定极限摩擦力的MBDM来说,若增大它的线速度,则能提高传动功率,但线速度太高时,离心拉力大,金属带与磁力带轮间的压力减小,有效拉力及传动功率反而降低。

最佳线速度是指在MBDM的正常工作速度范围内,传动功率为最大时的线速度。

由 $P = F_e v$ 及式(5)可知,MBDM的传动功率为

$$P = \frac{2(F_0 - \rho_1 v^2 + kB^2 r_1 b)(e^{\mu\alpha_1} - 1)v}{e^{\mu\alpha_1} + 1} \quad (8)$$

当 $F_0 - \rho_1 v^2 + kB^2 r_1 b = 0$ 时, $P = 0$, 这表明初拉力及磁场吸引力全部用来承担离心力。因此MBDM的极限线速度为

$$v_{\lim} = \sqrt{\frac{F_0 + kB^2 r_1 b}{\rho_1}} \quad (9)$$

式(8)两边分别对 v 求导,并令 $dP/dv = 0$, 则可求得传动功率为最大时的最佳线速度为

$$v_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{F_0 + kB^2 r_1 b}{3\rho_1}} = \frac{\sqrt{3}}{3} v_{\lim} \quad (10)$$

由式(10)可知,影响MBDM最佳线速度的主要因素有磁感应强度、初拉力、金属带的线质量及小带轮直径等。增大磁感应强度、初拉力及小带轮直径,MBDM的最佳线速度也相应增大。由于磁场吸引力的作用,MBDM的最佳线速度和极限线速度较普通带传动有较大幅度的提高,其值约为普通带传动的3~4倍。

将式(10)代入式(8),则MBDM的最大传动功率可表示为

$$P = \frac{4\sqrt{3}(F_0 + kB^2 r_1 b)^{\frac{3}{2}}(e^{\mu\alpha_1} - 1)}{9\sqrt{\rho_1}(e^{\mu\alpha_1} + 1)} \quad (11)$$

3.4 弹性滑动率

与普通带传动一样,MBDM的弹性滑动也是由带的弹性变形引起的。因此,其弹性滑动率的大小应等于金属带紧边的弹性伸长率与松边的弹性伸长率之差,即

$$\epsilon = \frac{F_1}{EA} - \frac{F_2}{EA} = \frac{F_e}{EA},$$

式中 ϵ 为弹性滑动率; A 为金属带的横截面积; E 为金属带的弹性模量。

将式(5)代入上式,可得

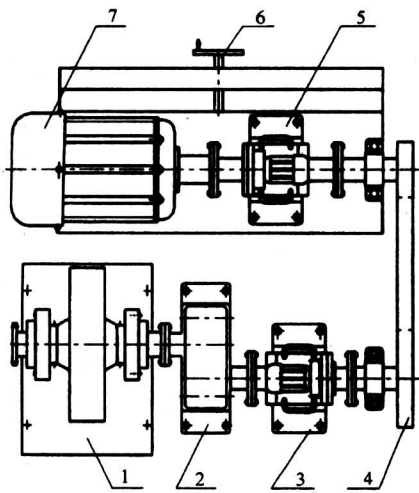
$$\epsilon = \frac{2(F_0 - \rho_1 v^2 + kB^2 r_1 b)(e^{\mu\alpha_1} - 1)}{EA(e^{\mu\alpha_1} + 1)} \quad (12)$$

由式(12)可知,MBDM的弹性滑动率与金属带的初拉力、横截面积和弹性模量以及包角、磁感应强度及小带轮直径等因素有关。由于金属带的弹性模量远大于普通胶带,因而,MBDM的弹性滑动必远小于普通带传动。

4 试验研究

MBDM试验台的结构如图5所示,其中主动磁力带轮的扭矩和转速由扭矩传感器3测出,从动磁力带轮的扭矩和转速由扭矩传感器5测出,负载由电涡流测功机1施加,电机转速通过变频器调节。金属带的初拉力可通过张紧装置6进行调节,并由电阻应变仪直接在金属带上测得。

利用上述实验装置,实测了MBDM在不同磁



1—涡流测功机, 2—增速器, 3, 5—扭矩传感器, 4—MBDM, 6—张紧装置, 7—变频电动机

图 5 MBDM 试验台结构

Fig.5 The structure of MBDM's experimental table

感应强度 B 、不同初拉力 F_0 及不同转速 n_1 等条件下的传动效率和弹性滑动率等参数随输入扭矩 T_1 变化的规律。

实验已知参数为小带轮直径 $d_1 = 180$ mm, 大带轮直径 $d_2 = 745$ mm; 传动中心距 $a = 960$ mm。实验结果如图 6 至图 8 所示。

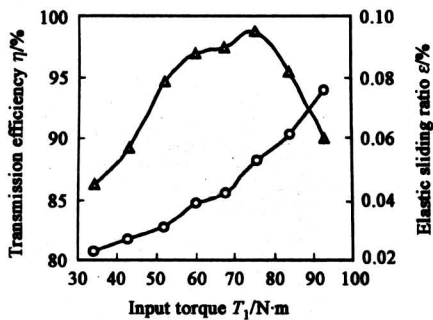


图 6 $B = 0, F_0 = 3\ 000\ N, n_1 = 750\ r/min$ 的试验结果

Fig.6 The experimental results as $B = 0, F_0 = 3\ 000\ N, n_1 = 750\ r/min$

由图 6 可知, 在 $B = 0, F_0 = 3\ 000\ N, n_1 = 750\ r/min$ 的实验条件下, 当输入扭矩为 $52 \sim 85\ N \cdot m$ 时, 传动效率稳定在 $95\% \sim 98\%$ 范围内 (见图中带 \triangle 的曲线); 当输入扭矩为 $75.23\ N \cdot m$ 时, 传动效率达到最大值 98.72% , 此时弹性滑动率为

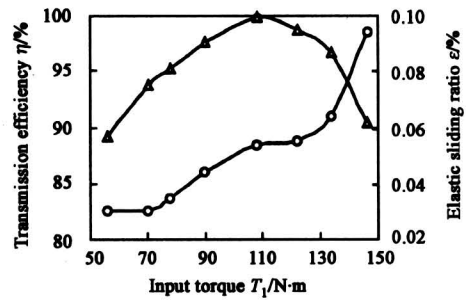


图 7 $B = 0.85\ T, F_0 = 2\ 000\ N, n_1 = 1\ 000\ r/min$ 的试验结果

Fig.7 The experimental results as $B = 0.85\ T, F_0 = 2\ 000\ N, n_1 = 1\ 000\ r/min$

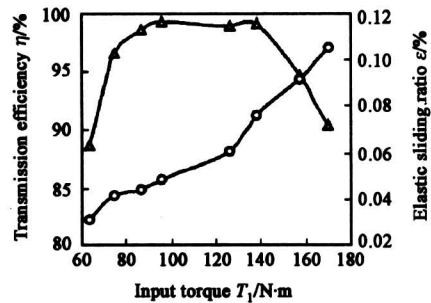


图 8 $B = 1.21\ T, F_0 = 1\ 000\ N, n_1 = 1\ 200\ r/min$ 的试验结果

Fig.8 The experimental results as $B = 1.21\ T, F_0 = 1\ 000\ N, n_1 = 1\ 200\ r/min$

0.053% (见图中带 \circ 的曲线)。由图 7 可知, 在 $B = 0.85\ T, F_0 = 2\ 000\ N, n_1 = 1\ 000\ r/min$ 的实验条件下, 当输入扭矩为 $76 \sim 138\ N \cdot m$ 时, 传动效率稳定在 $95\% \sim 98\%$ 范围内; 当输入扭矩为 $107.81\ N \cdot m$ 时, 传动效率达到最大值 99.79% , 此时的弹性滑动率为 0.054% 。由图 8 可知, 在 $B = 1.21\ T, F_0 = 1\ 000\ N, n_1 = 1\ 200\ r/min$ 的实验条件下, 当输入扭矩为 $72 \sim 155\ N \cdot m$ 时, 传动效率稳定在 $95\% \sim 98\%$ 范围内; 当输入扭矩为 $137.32\ N \cdot m$ 时, 传动效率达到最大值 99.02% , 此时的弹性滑动率为 0.076% 。

5 结论

1) MBDM 可分别采用电磁铁和稀土永磁体两种激磁方式, 当小带轮直径 $d_1 \leq 180$ mm 时, 可采用稀土永磁结构; 而当小带轮直径 $d_1 > 180$ mm

时,可采用电磁激磁方式。

2) MBDM 主要是利用磁场吸引力与初拉力的耦合作用来提高金属带与磁力带轮间的正压力和摩擦力进行运动和动力的传递的。其摩擦力的产生不再是初拉力单独作用,而是磁场吸引力和初拉力耦合作用的结果。

3) 在 MBDM 中,因磁场吸引力的作用而在金属带上产生吸引拉力的方向与弯曲拉力和离心拉力的方向相反,可抵消部分弯曲拉力和离心拉力,降低金属带的最大工作应力,改善金属带的受力状况、提高承载能力和使用寿命。

4) MBDM 的弹性滑动率仅为 0.02% ~ 0.05%,一般不超过 0.1%;传动效率可稳定在 95%~98% 范围内,最高达 99.5%,较普通带传动可提高 2~3 个百分点。

参考文献

[1] 罗善明. 磁力金属带传动的理论与试验研究[D].

徐州:中国矿业大学,2002

- [2] 罗善明,诸世敏. 磁力金属传动带的受力分析[J]. 机械工程学报,2000,36(7):106~108
- [3] Guebeli M, Micklem J D. Maximum transmission efficiency of a steel belt continuously variable transmission [J]. J of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 1993, 115 (4): 1044 ~ 1048
- [4] Chen T F, Lee D W, Sung C K. Experimental study on transmission efficiency of a rubber V-belt CVT [J]. Mechanism and Machine Theory, 1998, 33(4): 351 ~ 363
- [5] 程乃士,刘 温,郭大忠. 金属带式无级变速器传动效率的实验研究[J]. 东北大学学报,2000,21(4):394~396
- [6] 朱林剑,王德伦,梁 丰,等. 新型曲线槽 V 带传动的实验研究[J]. 大连理工大学学报,1995,35(5): 682~684
- [7] 黄大宇,梅 瑛,王晓璐. 带传动中弹性滑动的理论分析[J]. 机械传动,1997,21(2):36~39

Analysis on the Characteristics of Metal Belt Drive With Magnet

Luo Shanming, Guo Yingfu, Chen Anhua, Yu Yidao, Chen Lifeng

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

[Abstract]. The characteristics of metal belt drive with magnet (MBDM) are introduced in this paper. The transmission characteristics are also analyzed and discussed, such as effective tension, linear velocity and elastic sliding ratio. Finally, some performance parameters involved are determined by experiment. The results show that the friction force between pulley and metal belt can be increased by a great extent because of the coupling action of magnetic attraction and initial tension. The transmission efficiency of MBDM can reach from 95% to 98%, but the elastic sliding ratio is usually not more than 0.1%.

[Key words] belt drive; metal belt; magnetic attraction; electromechanical coupling