

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.07.013

曳引摩擦力计算方法分析研究

文耀平

(浙江飞亚电梯有限公司,浙江 金华 321010)

摘要:针对在电梯设计过程中缺乏曳引摩擦力计算方法这一问题进行研究,提出了一种实用的计算方法。该方法先对曳引轮和钢丝绳的受力情况作出分析,建立曳引轮两侧拉力与绳槽所受压力的关系式;根据比压在绳槽中的分布情况,建立压力与比压的关系式;再根据摩擦力与比压和摩擦系数的关系,用力学方法得出了曳引摩擦力的计算公式。一直以来在电梯的设计过程中都是采用欧拉公式进行曳引计算与校核,采用摩擦力计算公式是一种新的方法,该方法通过实例的计算校验证实,根据摩擦力计算公式得出的结果与欧拉公式得出的结果是一致的。研究结果表明,可以通过计算摩擦力的方法来验算曳引条件,并且还可以发现电梯设计过程中的不合理之处,弥补欧拉公式的不足之处。

关键词:电梯;摩擦力;计算公式;曳引条件;欧拉公式

中图分类号:TU857;TH123

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)07-0880-05

Analysis and research of traction friction calculation method

WEN Yao-ping

(Zhejiang Feiya Elevator co., LTD, Jinhua 321010, China)

Abstract: Aiming at the problem of the lack of traction friction calculation method in the process of the elevator design, a practical calculation method is put forward. At first, the force between traction wheel and wire rope were analyzed, a relationship between the tension on both sides of traction wheel and pressure on the wire rope groove was established; according to the specific pressure distribution in rope groove, the relationship between the pressure and specific pressure was established; according to the relationship between friction and specific pressure with the coefficient of friction, a calculation formula of friction force to tractive was deduced by mechanics method. In the process of the design of the elevator, euler's formula has always been used for traction calculation and checking, using the formula of friction force is a kind of new method, through calculation and check for instances, the friction calculation formula and the euler's formula are the same in calculation results. The results indicate that you can check the tractive conditions by using the method of calculating friction, find unreasonableness in the process of elevator design and make up for the deficiency of euler's formula

Key words: elevator; force of friction; computational formula; traction conditions; euler's formula

0 引 言

电梯属于摩擦曳引驱动的垂直运载工具^[1], GB7588—2003《电梯制造与安装安全规范》^[2]对曳引驱动电梯的定义为:提升绳靠主机的驱动轮绳槽的摩擦力驱动的电梯。因此,摩擦力对电梯来说是一个非常重要的概念。

一直以来,业内专家、工程技术人员对电梯在各种

工况及特殊情况下的曳引驱动问题作过许多分析和探讨,取得了很有价值的研究成果。其中有:朱思中^[3,4]分析了电梯曳引传动的两个特点,系统地讨论了电梯曳引计算过程中的一些关键问题;陈路阳^[5]阐述了电梯运行过程中钢丝绳在曳引轮槽中蠕动产生的机理,并且展示了欧拉公式的物理意义;杨锐^[6]从曳引传动的原理入手,对电梯标准中有疑问的地方进行了分析,并在此基础上对钢丝绳曳引的几个工况提出了新的见

收稿日期:2014-04-09

作者简介:文耀平(1954-),男,浙江金华人,高级工程师,主要从事电梯设计方面的研究。E-mail:WYP6297@126.com

解。但是所有有关摩擦曳引驱动的研究,基本上都是依据欧拉公式这一理论基础。欧拉公式是挠性体摩擦传动的公式,主要用于分析、校核挠性体摩擦传动的打滑条件,以及功率传递等问题。但是欧拉公式并不涉及摩擦力的计算,在电梯的设计与技术实践中,如果能算出电梯在各种工况条件下的摩擦力数值,就可以用比较直观的摩擦力数据来分析探讨电梯的曳引驱动问题。

本研究就电梯的曳引摩擦力计算作一些分析研究。

1 曳引轮与钢丝绳的受力分析

1.1 电梯的基本结构型式

电梯的两种基本结构型式如图1所示。图1中曳引钢丝绳在两端拉力 T_1 和 T_2 的作用下,沿曳引轮圆弧面对绳槽产生压力,其中 T_1 为电梯轿厢一侧的拉力, T_2 为对重一侧的拉力,有下列关系式:

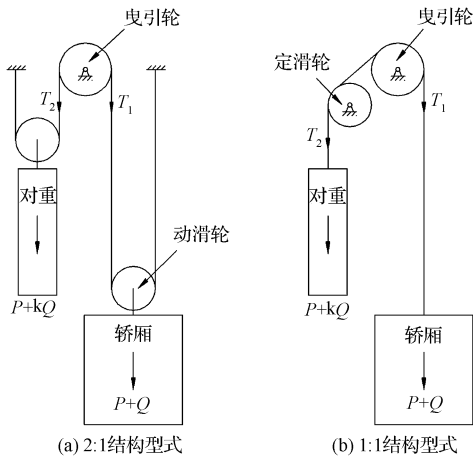


图1 电梯的基本结构和受力示意图

$$\begin{cases} T_1 = \frac{(P+Q)g_n}{n} \\ T_2 = \frac{(P+kQ)g_n}{n} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P —轿厢的自重, kg; Q —电梯的额定载重量, kg; k —平衡系数, 由对重平衡的电梯额定载重量的百分比, 按规定为 40% ~ 50%; n —曳引比, 为钢丝绳曳引系统组成的动滑轮组的倍率, 有动滑轮时为 2 : 1, 无动滑轮时为 1 : 1; g_n —重力加速度, 9.81 m/s²。

为便于分析, 在上式中暂略去钢丝绳的自重。并令: $T_1 > T_2$ 。

1.2 钢丝绳作用在曳引轮上压力 p_1 的计算

曳引轮受力分析图如图2所示。本研究截取微量单位弧长钢丝绳 dl 为分离体, 对应的包角为 $d\varphi$, 微弧

两端的拉力为 T 、 $T+dT$, 曳引轮作用在微弧段 dl 上的正压力 dN 为:

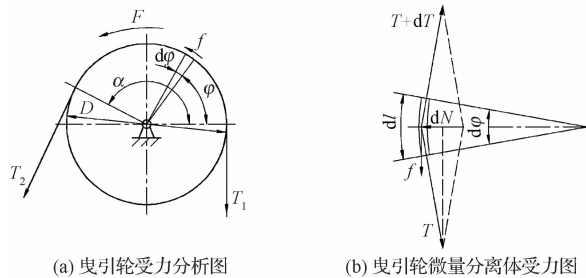


图2 曳引轮受力分析图

D —曳引轮直径; α —钢丝绳在曳引轮圆周上缠绕的包角; F —曳引摩擦力

$$dN = T \sin \frac{d\varphi}{2} + (T+dT) \sin \frac{d\varphi}{2}$$

上式中因 $d\varphi$ 很小, 可取 $\sin(d\varphi/2) \approx d\varphi/2$, 并略去二次微量 $dT \sin(d\varphi/2)$, 于是可得:

$$dN = Td\varphi$$

单位弧长上的压力为:

$$p_1 = \frac{dN}{dl} = \frac{Td\varphi}{D} = \frac{2T}{D} \quad (2)$$

在上式中 $2T$ 应为曳引轮两端的拉力之和, 因此有:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (3)$$

1.3 曳引轮绳槽上比压 q 的计算

现在的曳引轮绳槽基本上都是带有切口的半圆槽, 绳槽比压分布图如图3所示。

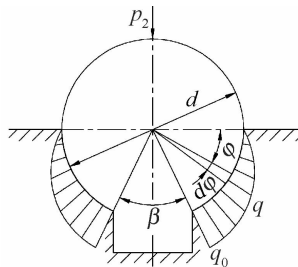


图3 绳槽比压分布图

d —钢丝绳直径; β —轮槽底部切口与圆心之间的夹角; q —轮槽在钢丝绳压力的作用下沿槽壁分布的比压

从图3中可以看出, 槽底的比压最大, 两侧上缘最小, 因此比压应按正弦分布, 即:

$$q = q_0 \sin\varphi$$

设 p_2 为微量长度钢丝绳对轮槽产生的压力, p_2 与比压成正比, 在轮槽中也按正弦分布:

$$p_2 = 2 \int_0^{\frac{\pi-\beta}{2}} q \frac{d}{2} d\varphi \sin\varphi = q_0 d \int_0^{\frac{\pi-\beta}{2}} \sin^2\varphi d\varphi = q_0 d \frac{\pi - \beta - \sin\beta}{4} \quad (4)$$

p_1 和 p_2 是同一个微量长度钢丝绳在曳引轮上某点的同一个压力, p_1 是在曳引轮圆周正面上表述, p_2 是在与曳引轮圆周正面呈 90° 方向的绳槽剖面上表述, 因此有:

$$p_1 = p_2$$

根据式(2)和式(4)有:

$$q_0 = \frac{8T}{d \cdot D(\pi - \beta - \sin\beta)} \quad (5)$$

2 曳引轮圆周上摩擦力 F 的计算分析

2.1 推导摩擦力计算公式

如图 3 所示, 在绳槽某截面上的微量摩擦力应等于单位长度的比压乘以摩擦系数:

$$\Delta f = \mu q \frac{d}{2} d\varphi$$

单位长度钢丝绳的摩擦力为:

$$f = 2 \int_0^{\frac{\pi-\beta}{2}} \mu q \frac{d}{2} d\varphi = \mu q_0 d \int_0^{\frac{\pi-\beta}{2}} \sin\varphi d\varphi = \mu q_0 d \left(1 - \sin \frac{\beta}{2}\right) \quad (6)$$

式中: μ —摩擦系数。

曳引轮圆周上的摩擦力的分布如图 2(a) 所示:

$$\Delta F = f \frac{D}{2} d\varphi$$

$$F = \int_0^\alpha f \frac{D}{2} d\varphi = \frac{\alpha f D}{2} \quad (7)$$

将式(5)和式(6)代入式(7)整理得:

$$F = \alpha T \mu \frac{4 \left(1 - \sin \frac{\beta}{2}\right)}{\pi - \beta - \sin\beta} \quad (8)$$

令:

$$\mu' = \mu \frac{4 \left(1 - \sin \frac{\beta}{2}\right)}{\pi - \beta - \sin\beta} \quad (9)$$

式中: μ' —当量摩擦系数。

将式(3)和式(9)代入式(8)整理得:

$$F = \alpha T \mu' = \frac{\alpha(T_1 + T_2)}{2} \mu' \quad (10)$$

上式可用于计算曳引轮圆周上的摩擦力。

电梯的曳引摩擦力 F 不是作用在某一固定点的集中力, 而是在钢丝绳与曳引轮槽接触面上产生的摩擦力的总和, 是分布在包角 α 范围内的。在一定的条

件下, 钢丝绳与曳引轮槽接触面上产生的摩擦力有一极限值, 即最大摩擦力。当最大摩擦力不小于曳引轮两边的拉力差时, 曳引驱动才能正常传递动力。如果两边的拉力差过大, 超过了这一极限值时, 钢丝绳将在曳引轮上打滑造成曳引失败。由于对重一侧的拉力 T_2 是常数, 从曳引轮两侧的拉力差与摩擦力的关系可以得出:

$$T'_1 = T_2 + F \quad (11)$$

式中: T'_1 —是用摩擦力公式计算出来的轿厢侧的允许拉力。

2.2 与摩擦力相关的因素分析

从公式(10)可以看出, 摩擦力 F 与下列几个因素有关:

(1) 摩擦力 F 与曳引轮两侧钢丝绳的拉力成正比, 当电梯的额定载荷确定后, 适当增加轿厢的自重可以增大拉力, 从而相应增大摩擦力;

(2) 增大钢丝绳在曳引轮上的缠绕包角 α 可以增大摩擦力, 这是因为增大包角可以增加钢丝绳在曳引轮圆周面上的接触弧长, 在每一段微小的弧长上都会产生相应的摩擦力;

(3) 绳槽底部的切口对钢丝绳有楔入夹紧作用, 增大切口角 β 可使切口的宽度增加, 使钢丝绳楔入更深, 夹得更紧, 产生的摩擦力也更大。 β 角过大时就变成 V 形槽了, V 形槽虽然摩擦力很大, 但也容易使钢丝绳和轮槽磨损。根据曳引轮绳槽的设计要求, 绳槽的切口角 β 一般为 $70^\circ \sim 106^\circ$, 在该范围内增大 β 角度可以相应增大当量摩擦系数, 从而增大摩擦力。

3 实例计算及校验

因轿厢的载重量是在 0 到额定载荷 Q 之间变化, 轿厢侧的拉力 T_1 是变量, 而对重侧的拉力 T_2 是常量。根据 GB7588 标准的规定, 电梯在检验时必须按 125% 的额定载重量做静载防滑试验和低速运行时的制动试验, 因此 T_1 应按 $1.25Q$ 载重量计算。

3.1 实例 1

该电梯的基本结构如图 1(a) 所示。

已知 $Q = 2\,000\text{ kg}$, $P = 1\,400\text{ kg}$, $k = 45\%$, $n = 2$, $\alpha = 180^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\mu = 0.1$;

先按式(9)算出 $\mu' = 0.205$ 。

再把已知数据代入上述各式, 算得数据如表 1 所示。

表 1 实例 1 电梯数据

T_2 (N)	T_1 (N)	T'_1 (N)	F (N)	T_1/T_2	T'_1/T_2	$e^{\mu\alpha}$
11 270	19 110	21 053	9 783	1.695	1.868	1.904

3.2 实例 2

该电梯的基本结构如图 1(b) 所示。

已知 $Q = 1\ 000\ \text{kg}$, $P = 1\ 000\ \text{kg}$, $k = 45\%$, $n = 1$, $\alpha = 150^\circ$;

同实例 1, $\beta = 90^\circ$, $\mu = 0.1$, $\mu' = 0.205$ 。

再把已知数据代入上述各式,算得数据如表 2 所示。

表 2 实例 2 电梯数据

T_2 (N)	T_1 (N)	T'_1 (N)	F (N)	T_1/T_2	T'_1/T_2	$e^{\mu\alpha}$
14 210	22 050	23 940	9 730	1.552	1.685	1.710

对表 1 和表 2 中的数据进行分析比较得出:

$$\frac{T_1}{T_2} < \frac{T'_1}{T_2} < e^{\mu'\alpha}$$

这两个实例的结论是:轿厢载有 125% Q 的最大试验载荷运行时,钢丝绳不会打滑。摩擦力计算公式得出的结果是符合欧拉公式确立的曳引条件的,并且从这两个例子中也得出:

$$T_1 < T'_1 \quad (12)$$

这也说明通过摩擦力的计算,只要上式成立,也就是轿厢侧的允许拉力大于设计拉力,曳引条件就能成立。这是两个力的大小比较,比欧拉公式更为直观。

3.3 实例 3 对一起电梯曳引故障的分析

本例选用^[7]报道的一起故障,该电梯的基本结构如图 1(a) 所示。

当电梯向下行驶时由于安全钳的误动作,使轿厢被钳制在导轨上停止。根据 GB7588 标准^[8]的规定,这时如果曳引轮还在转动,应使钢丝绳在轮槽内打滑,不能将对重提起。然而在现实中有发生将对重强制提起的现象,报道的就是一例,笔者也曾在工作实践中见到过一例。

当轿厢被突然钳制停止时,轿厢侧的拉力 T_1 已消失,对重是怎么被强制提起来的,业内工程技术人员对此有各种分析和解释,其中,文献[7]还对依据欧拉公式计算得出的结果提出疑问。这也说明仅从欧拉公式得不出合理的解释。发生这种情况表明曳引轮上的摩擦力并没有随着 T_1 消失而消失或者减小,并且这个摩擦力还要大于对重侧的拉力 T_2 ,应该从摩擦力方面来找原因^[9-11]。

已知: $Q = 2\ 000\ \text{kg}$, $P = 1\ 100\ \text{kg}$, $k = 41\%$; $n = 2$,

$\alpha = 180^\circ$;

按设计允许范围假设: $\beta = 100^\circ$, $\mu = 0.11$;

先按式(9)算出: $\mu' = 0.25$;

电梯正常运行时 T_1 按额定载重量 Q 计算。

把已知数据代入上述各式,算得数据如表 3 所示。

表 3 实例 3 电梯数据

T_2 (N)	T_1 (N)	T'_1 (N)	F (N)	T_1/T_2	T'_1/T_2	$e^{\mu\alpha}$
9 408	15 190	19 067	9 659	1.615	2.026	2.193

分析表 3 中的数据得出:该电梯的曳引条件符合欧拉公式的要求,但是钢丝绳在曳引轮槽内产生的摩擦力大于对重侧的拉力,即: $T_2 < F$ 。当电梯在下行途中被突然钳制住时,轿厢侧的拉力 T_1 消失。但是在这之前的正常情况下,钢丝绳在曳引轮两侧拉力的作用下,楔入绳槽中受槽壁的挤压被夹紧,同时绳在槽底又被楔入切口口中夹紧(这与绳槽的结构形状有关),钢丝绳相当于楔块,与绳槽壁及切口接触面之间的摩擦角很小,处于机械自锁状态^[12-13],既使 T_1 消失也不会使曳引轮圆周包角 α 弧线内的这段钢丝绳松弛而失去摩擦力,并且在对重一侧的拉力 T_2 的作用下保持了夹紧力,从而保持了原先的摩擦力,随着曳引轮的继续转动,如果原先的摩擦力小于对重侧的拉力 T_2 ,钢丝绳在曳引轮槽中打滑,不会提起对重;如果原先的摩擦力大于对重侧的拉力 T_2 并且被保持住,在摩擦力的作用下对重会被强制提起。

通过曳引摩擦力的计算,并且结合机械原理的知识,可以对这类特殊的电梯故障现象作出比较合理的解释。

实例(3)也可以说明,在电梯的设计过程中如果参数选用不当是有可能出现摩擦力大于对重侧的拉力的情况。这一点也只有通过摩擦力的计算才能发现,这也说明欧拉公式用于曳引计算还存在不足之处。

从实例(3)中可以得出一个结论,如果该电梯在设计时计算过摩擦力,并且有: $T_2 > F$ 。那么当电梯在下行途中被突然钳制住时,就不会发生将对重强制提起的现象。

4 结束语

电梯的驱动方式从其力学本质上说就是摩擦力传
(下转第 897 页)

本文引用格式:

文耀平. 曳引摩擦力计算方法分析研究[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 880 - 883, 897.

WEN Yao-ping. Analysis and research of traction friction calculation method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7): 880 - 883, 897.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

Single Neuron Self-Adaptive PID Controller of Brushless DC Motor[C]//2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). Shanghai:[s. n.],2011:262-266.

- [6] 舒怀林. PID 神经网络及其控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [7] 周理孟. 永磁伺服系统智能 PID 控制方法研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学计算机学院,2009.
- [8] 申亮,谢伟东. 永磁直流无刷电机改进的单神经元 PID 自

适应控制仿真研究[J]. 机电工程,2011,28(3):369-373.

- [9] 李岩,张超,刘陵顺. 无刷同步电机的起动机性能仿真[J]. 兵工自动化,2012,31(1):81-85.
- [10] 王秀君,胡协和. 一种改进的单神经元 PID 控制策略[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(8):1498-1501.
- [11] 郭红霞,杨金明,刘文刚. 无刷双馈电机的 PID 神经网络控制[J]. 控制理论与应用,2008,25(1):53-56.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

赵鹏飞,俞建定,骆国庆. 基于神经元 PID 的永磁无刷电机控制系统研究[J]. 机电工程,2014,31(7):892-897.

ZHAO Peng-fei, YU Jian-ding, LUO Guo-qing. Control system of brushless DC motor based on neuron PID[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):892-897.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 883 页)

动,电梯驱动的基本原理也就是欧拉公式所确立的摩擦曳引条件。在欧拉公式的推导过程中虽然也包含了摩擦力的因素,但在最终的结果中却与摩擦力的计算无关,摩擦力只是隐含在欧拉公式中的一个力学概念。在电梯的曳引力分析与计算过程中,虽然屡屡提及摩擦力,但却无法计算。

本研究分析了曳引轮和绳槽的受力情况,通过建立拉力、压力、比压和摩擦系数几个物理量之间的关系式,用力学方法得出了曳引摩擦力的计算公式。通过实例的计算校验可以看出,根据摩擦力计算公式得出的结果与欧拉公式得出的结果是一致的,并且两者在数值上很接近。因此,可以通过计算摩擦力的方法来验算曳引条件。摩擦力计算方法是以两个力的大小比较来确定曳引条件,比欧拉公式更为直观。此外,摩擦力计算公式还可用于分析一些特殊的曳引故障现象,弥补了欧拉公式在这方面的不足之处。

摩擦力计算方法在实用时,可先按公式(10)算出摩擦力 F ,再按公式(11)算出轿厢侧的允许拉力 T_1' ,其结果只要符合公式(12),就可以认为曳引条件成立,钢丝绳不会打滑。此外还要验算不能使摩擦力大于对重侧的拉力。

参考文献(References):

- [1] 杨长骅. 起重机械[M]. 北京:机械工业出版社. 1982.

- [2] 中国建筑科学研究院建筑机械化研究分院. GB7588—2003,电梯制造与安装安全规范[S]. 中国建筑学院建筑机械化研究分院,2003.
- [3] 朱思中. 电梯的曳引计算(1)[J]. 中国电梯,2013,24(1):5-11.
- [4] 朱思中. 电梯的曳引计算(2)[J]. 中国电梯,2013,24(3):24-27.
- [5] 陈路阳. 电梯曳引绳在曳引轮绳槽中的蠕动与欧拉公式[J]. 中国电梯,2011,22(17):37-40.
- [6] 杨锐. 关于电梯曳引条件的一些问题的探讨[J]. 中国电梯,2013,24(5):27-30.
- [7] 梁振湖. 由电梯曳引机的损坏引发的对曳引力的思考[J]. 中国电梯,2014,25(3):29-31.
- [8] 曾晓东. 钢丝绳及滑轮系统动力学—GB7588—2003 附录 M 的曳引力计算公式更正[J]. 中国电梯,2007,18(19):45-51.
- [9] 吴昊,冯双昌. 电梯制动失效原因分析及检验对策[J]. 机电工程技术,2013,42(12):103-105.
- [10] 王宝强,许卫东. 对曳引式电梯上行制动试验制动距离的探讨[J]. 机械,2013(11):50-52.
- [11] 关金生. 电梯紧急制动减速度的理论分析[J]. 中国电梯,2014,25(1):17-22.
- [12] 刘照东. 通过两个实例再议电梯安全钳试验打滑条件[J]. 中国电梯,2013,24(17):55-57.
- [13] 杨锐. 关于电梯曳引轮槽型与摩擦系数的探讨[J]. 中国电梯,2012,23(15):49-53.

[编辑:洪炜娜]