

浅谈变压器用绕线机张力值计算

连俊杰¹ 李 杨¹ 张 毅²

(1. 北京七星飞行电子有限公司 2. 东莞市鑫华翼自动科技有限公司)

摘要：本文通过提出变压器用绕线机中对漆包线的抗拉强度、伸缩率等计算公式的推导，计算出张力器设置的漆包线的安全张力。通过安全张力值对绕线机进行合理控制，进而方便变压器绕线的稳定性和可靠性，对变压器行业的自动化、高质量发展具有重要意义。

关键词：绕线机；张力控制；抗拉强度；安全张力

0 引言

2024 年的政府工作报告中“大力推进现代化产业体系建设，加快发展新质生产力”被列为 2024 年十大工作任务之首。这也是今后工作的重要着力点，对推动高质量发展具有十分重要的意义。磁性器件广泛应用于新能源、新材料、先进制造和电子信息等战略性新兴产业，尤其是目前我国全面推进智能制造，高质量、高效率的绕线设备应用于磁性器件，在加快形成新质生产力方面发挥了基础性作用。绕线机经历了手动绕线、半自动绕线和自动绕线阶段。制造业的快速发展，尤其是电子、电器、通信等相关行业的快速兴起和发展，对于高质量、高效率的智能绕线设备有了需求。

目前，我国全面推进智能制造，对于绕线设备的精度要求进一步提升，尤其是优质产品的需求。绕线机在人机界面的精准控制下，引入张力器、绕制线圈的同时控制漆包线张力，保证了线圈的稳定性和平整度等。张力器产生可调性张力，传递恒定扭力，

确保漆包线张紧力度合适，从而使得绕制的线圈更整齐、更紧凑。有了张力器，漆包线经过张力器，静态摩擦变为动态摩擦，绝缘层伤害大大降低，更好地保护了绝缘层。而且，张力器可以控制张力精度，张力适度，绕线时排线就会更整齐和紧凑，电性能方面比如分布电容等性能更好，节约漆包线，节省成本；与此同时，张力器安装容易，适用于各种绕线机，调节过程也比较简单，可根据对应的张力数值，调整合适张力数值。

1 概述

1.1 研究背景及发展现状

近年来，随着国内生产水平的提升，对各种电子产品的需求日益增加，而变压器作为电子产品的重要组成部分，对变压器也提出了更高质量的要求^[1]。绕组线是变压器的主要组成部分，绕组线圈中的漆包线和绝缘带的质量决定变压器的质量和可靠性^[2]。一台性能稳定、高可靠性的变压器离不开漆包线智能化的张力

控制。目前我国变压器绕线机行业发展较为落后，在这种情况下，研究和总结变压器用绕线机的张力控制对变压器行业的发展具有深刻的意义。

1.2 变压器用绕线机国内外发展现状

国外变压器绕线机起步早，经过多年的发展和生产实践的不断完善，现在已具备完整且成熟的体系，且在全球范围内市场占有率高^[3-4]。例如，印度 Trishul-Engineers 公司的 T-600AH，可实现导线与绝缘带同步缠绕，绕线精度高且张力稳定；加拿大 MTM、瑞士 Tuboly - Astronic、韩国 UPI、意大利 LAE 等公司生产的绕线机也具备稳定的工作性能^[5]。

我国开始研制变压器用绕线机是在 20 世纪 70 年代。由于该技术垄断，我国变压器用绕线机还停留在半自动化阶段，在绝缘层自动化和控制方案上与国外还存在差距。目前，国内生产的变压器绕线机有东莞市鑫华翼自动化科技有限公司的立式绕线机、卧式绕线机等，绕线机可引入张力器，根据线材进行多段张力调控，以便满足变压器自动绕线的需求，保证变压器绕组线张力的稳定性；许多变压器行业的生产厂商在生产过程中也引入了张力控制，如江苏晨朗电子集团有限公司、深圳市京泉华科技股份有限公司、抚州市双菱磁性材料有限公司、宁波中策亿特电子有限公司、浙江埃能德电气股份有限公司、东莞铭普光磁股份有限公司、北京七星飞行电子有限公司、深圳可立克科技股份有限公司、广东力王高新科技股份有限公司等等，张力控制保障了变压器的质量和可靠性。

由此可见，变压器的质量和可靠性离不开绕线机对漆包线张力的控制。

2 变压器用漆包线张力

在变压器线圈绕制中，由于绕组半径会随着绕线圈数而改变，导致线张力的波动变化，进一步会影响漆包线的品质。张力太小会造成漆包线绕制不均匀，张力

太大甚至会使漆包线发生断裂，张力太小或太大都会影响变压器的质量^[6]。所以，在绕线机中引入张力器，设定漆包线的安全张力，可以有效调控张力的大小，达到对变压器漆包线的张力调控，确保绕组稳定性。

2.1 张力计工作原理

张力计测试原理示意图如图 1 所示，张力器中的张力计连接小导轮，在两导轮连线的中心处垂直推（或拉）到一定位置。一般来说，常见两种张力测试方法为手持式张力计法和张力测试仪法。

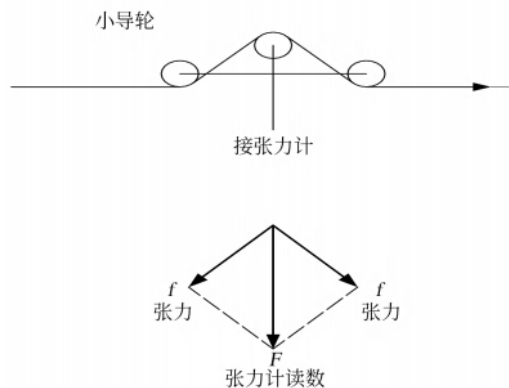


图 1 张力计测试原理示意图

2.1.1 手持式张力计法

手持式张力计的张力范围大、使用线径广、通用性强；张力产生采用多对 NS 磁场，无机械滑动摩擦，张力稳定性好，使用寿命长等（见图 2）。市面常见的张力计主要由张力计公司生产，如杭州千和，根据张力不同，型号大小不同，张力范围 4~2000g；具体的操作步骤如下：

- 1) 选定量程内张力计；
- 2) 将漆包线卡在张力计定位轮上；
- 3) 将张力器放置于线中段（偏向出线口不小于 15mm 的位置）进行测试；
- 4) 测试时张力计和漆包线保持平行状态；
- 5) 当绕线机运行时，张力计的指针峰值为实测张力值。



图2 手持式张力计

2.1.2 张力测试仪法

张力测试仪一般具有可设置两段张力, 可以进行张力跟随, 在张力范围内上下限报警等功能, 图3为某公司张力计的外形和安装尺寸。张力测试仪使用步骤如下:

- 1) 选定量程内张力计;
- 2) 将张力计定位在定位片上, 张力计与定位片紧密卡合, 并位于张力区域中间偏向出线口不小于15mm的位置;
- 3) 打开张力计, 读数归零;
- 4) 打开显示器, 设置为测试状态自动模式;
- 5) 测试开始后, 在转速稳定状态下记录读数。

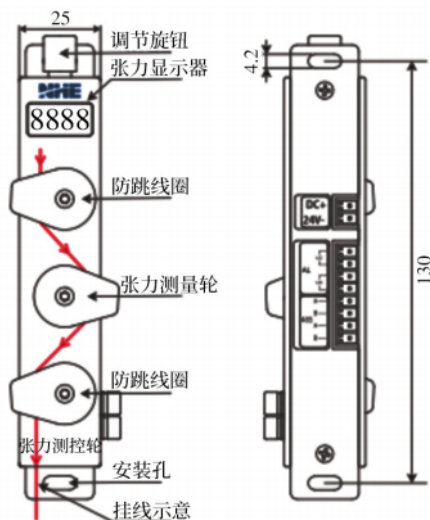


图3 张力测试仪的外形及安装尺寸图

2.2 漆包线安全张力计算

漆包线是一种由铜线或铝线作为芯线, 再经过多层绝缘漆涂制而成的电工材料, 主要用于变压器等电器设备的线圈绕制材料。本文以漆包铜线为例, 计算其在变压器中绕制过程中的安全张力。

2.2.1 漆包线抗拉强度

《电线电缆手册(3)》中规定, 漆包线在拉伸试验过程中, 试样最大拉力所对应的应力称为抗拉强度^[7], 抗拉强度和试样原始横截面积成反比, 与最大拉力成正比, 见式(1):

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1)$$

式中, σ_b 为漆包线的抗拉强度, N/mm^2 ; F_b 为最大拉力, N ; S_0 为试样原始横截面积, mm^2 。

金属热胀冷缩的物理属性, 试样的截面积会随着温度变化比标准截面积增加或减小。试样的单位截面积随温度变化, 由式(2)计算:

$$A(t) = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2)$$

式中, $A(t)$ 为在试验温度 t 时试样的截面积, mm^2 ; π 为圆周率, 3.1416; d 为漆包线的直径, mm 。

2.2.2 漆包线安全张力

由式(1)和式(2)推导得出漆包线在 t 温度时截面积和最大拉力的乘积就是安全张力, 见式(3):

$$T = \frac{\sigma_b \pi d^2}{4} \quad (3)$$

式中, T 为漆包线的安全张力, N 。

而漆包线的安全张力与伸长率即拉伸度有紧密的关系, 因此, 在式(3)中引入漆包线的安全拉伸度(根据生产商实际生产情况推荐取值0.2~0.3), 得到了有关安全拉伸度的漆包线安全张力计算公式, 见式(4):

$$T = \frac{b \sigma_b \pi d^2}{4} \quad (4)$$

式中, T 为漆包线的安全张力, N ; b 为漆包线的

安全拉伸度，推荐取值 0.2~0.3； σ_b 为漆包线的抗拉强度， N/mm^2 ，推荐取值 200~350 N/mm^2 ； d 为漆包线的直径，mm。

根据漆包线的线径不同，计算出表 1 中不同线径的安全张力值和最大张力值，该值为合理区间内的取值，由于受到不同环境等的影响，该表所列数值略微小于计算数值。当线径取 0.10mm、 σ_b 取 320 N/mm^2 、 b 取 0.28 时，计算得出的拉力值为 72g（表 1 中为 78g）；当线径取 0.20mm、 σ_b 取 300 N/mm^2 、 b 取 0.28 时，计算得出的拉力值为 269g（表 1 中为 272g）；当线径取 0.60mm、 σ_b 取 240 N/mm^2 、 b 取 0.28 时，计算得出的拉力值为 1900g（表 1 中为 1930g）。

表 1 中漆包线直径和张力的对照表，是根据日本 Tanaka Seiki Co., Ltd、×× 电子公司、×× 张力计公司和 ×× 漆包线公司提供的安全张力值数据进行对比。表 1 中，安全张力和最大张力是 ×× 电子有限公司根据日本 Tanaka Seiki Co., Ltd 专业厂商的数据，选择漆包线从 0.18 mm、0.22 mm、0.27 mm、0.30 mm、0.35 mm、0.45 mm、0.57 mm、0.65 mm、0.90 mm 和 1.00 mm 的线径进行试验验证后得到，并且已发布团体标准^[8]。

×× 张力计公司和 ×× 漆包线公司提供的数值比日本 Tanaka Seiki Co., Ltd 提供的安全张力值略小。

最终张力值的选择为根据绕线机专业厂家进行过相关验证的数值，由于漆包线张力与绕线机、漆包线绝缘材料、绕线圈数、绕线整齐度、张力计等有关，具体要求在各公司企业标准中确定，表 1 中所列数值仅供参考。

3 结束语

通过对手持式张力计法和张力器测试两种张力测试方法的梳理，对变压器用漆包线张力参数进行规定，根据变压器漆包线拉伸强度和安全拉伸度和实际

表 1 漆包线张力对应表

漆包线直径 (mm)	安全张力 (g)	最大张力 (g)	日本 Tanaka Seiki Co., Ltd	××张力计公司	××漆包线公司
0.02	3.4	4.9	3.5	2.2	
0.03	8.8	10.8	9.0	4.9	
0.04	13.2	15.8	13.5	8.6	
0.05	19.9	22.7	20.3	13.0	
0.06	28.4	31.4	29.0	19.0	
0.07	39.8	43.3	40.6	26.0	
0.08	49	52.7	50.0	35.0	
0.09	61.3	65.7	62.6	44.0	
0.10	76.4	81.3	78.0	54.0	
0.11	91.1	96.4	93.0	65.0	
0.12	105.8	110.1	108.0	78.0	66
0.13	122.5	129.1	125.0	91.0	78
0.14	140.1	150	143.0	110.0	90
0.15	157.8	172	161.0	120.0	104
0.16	177.4	196	181.0	140.0	118
0.17	198.9	220.9	203.0	160.0	133
0.18	220.5	247.6	225.0	170.0	149
0.19	243	276	248.0	190.0	166
0.20	266.6	305.8	272.0	220.0	184
0.21	292	337.1	298.0	240.0	203
0.22	316.5	370	323.0	260.0	223
0.23	343	404.3	350.0	290.0	244
0.24	372.4	440.3	380.0	310.0	265
0.25	401.8	477.8	410.0	340.0	288
0.26	429.2	516.8	438.0	360.0	312
0.27	460.6	557.13	470.0	390.0	336
0.28	494.9	599.3	505.0	420.0	361
0.29	524.3	642.9	535.0	450.0	388
0.30	553.7	688	565.0	490.0	415
0.32	622.3	783	635.0	550.0	472
0.35	731.1	936.9	746.0	660.0	565
0.37	803.6	1048.6	820.0	740.0	631
0.40	931	1225	950.0	860.0	737
0.45	1136.8	1548.4	1160.0	1090.0	933
0.50	1372	1911	1400.0	1350.0	1152
0.55	1617	2312.8	1650.0	1630.0	1394
0.60	1891.4	2753.8	1930.0	1940.0	1659
0.65	2175.6	3292.8	2220.0	2280.0	1947
0.70	2469.6	3704.4	2520.0	2640.0	2258
0.75	2773.4	4312	2830.0	3030.0	2592
0.80	3106.6	4900	3170.0	3450.0	2949
0.90	3802.4	6193.6	3880.0	4370.0	3733
1.00	4537.4	7644	4630.0	5390.0	4608

生产情况和《电线电缆手册（3）》中的拉伸度等参

数进行换算，推演出漆包线安全张力值计算公式：
$$T = \frac{b\sigma_b\pi d^2}{4}$$
，一般来说，安全拉伸度 b 取值0.2~0.3；其次，根据各生产单位提供的数据和验证结果，对漆包线安全张力和最大张力进行规定；最后，收集行业内变压器公司数据，对以上内容进行总结，适时起草了《电子变压器用自动绕线机张力控制要求和试验方法》团体标准。

张力控制对推动行业进步具有重要的意义，得到了行业内各公司的广泛认可，推动生产企业对标和落实新质生产力发展要求，进一步提高变压器性能，促进产品质量提升，并在提质增效、培育竞争新优势、促进贸易等方面发挥重要作用。

参考文献

[1] 刘晓龙. 电力变压器立式绕线机准自动控制系统的研究 [D]. 济南：山东大学，2016.

- [2] 高云泽，张华杰，许号永. 自动排线绕线机导线张力可调系统设计及实现[J]. 自动化技术与应用，2020，39（4）：27-30.
- [3] 朱万秋，苑迪文，曹承东，等. 基于模糊自适应PID的恒张力卷绕系统设计[J]. 工业控制计算机，2020，23（8）：66-72.
- [4] 郑涛. 系留无人机绕线系统的研究与设计 [D]. 绵阳：西南科技大学，2019.
- [5] 任浩楠. 变压器绕线机张力控制系统的设计与研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2021.
- [6] 高庆利. 电压互感器一次绕组及其绕制方法的改进 [J]. 变压器，2020，57（5）：21-22.
- [7] 张秀松. 电线电缆手册（3）[M]. 北京：机械工业出版社，2017.
- [8] T/CECA 97—2024 电子变压器用自动绕线机张力控制要求和试验方法 [S].

（收稿日期：2024-07-15）