

# 一种小型锁销式锁制器的设计

廖庆文<sup>1,2</sup>, 殷唯凯<sup>1,2</sup>, 陈强<sup>1,2</sup>

(1. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550081)

**摘要:** 介绍了一种适用于在恶劣温度、力学环境条件下使用, 具有高可靠性的锁销式锁制器的设计。简介了锁制器的工作原理和结构。针对实际使用中出现的故障, 采取了相应的改进设计措施并通过试验验证, 并重点介绍了锁销式锁制器的设计要点和细节, 以供类似结构锁制器设计参考借鉴。

**关键词:** 解锁; 锁制器; 细节

**中图分类号:** TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)08-0045-05

## Design of a Small Lockpin Type Lock Device

LIAO Qingwen<sup>1,2</sup>, YIN Weikai<sup>1,2</sup>, CHEN Qiang<sup>1,2</sup>

(1. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550081, China;

2. National Precision Microelectric Engineering Technology Research Center, Guiyang 550081, China)

**Abstract:** The design of a locking pin type lock with high reliability under harsh temperature and mechanical environment was introduced. The principle and structure of the work were introduced. In view of the faults in actual use, corresponding improvement design measures were adopted and verified by tests, the design points and details of this kind of lock maker were put forward.

**Key words:** unlock; lock device; detail

## 0 引言

锁制器是一种位置控制装置, 对电机旋转轴进行锁制和解锁, 最终实现对电机旋转轴圆周角度位置锁制和解锁。

随着系统需求的不断扩大, 位置精度控制的要求不断提高, 锁制器的应用越来越广泛。锁销式结构锁制器应用于各种舵机系统中, 以提高舵机系统初始阶段的稳定性, 舵机系统为整颗导弹的分系统, 进而提高控制精度。

锁制器按结构形式可分为锁销式和摩擦片式。传统锁制器采用摩擦片形式, 在挂机振动测试或实际使用中, 存在摩擦力矩变化过大的问题, 导致锁制力矩变小, 摩擦片圆周逐渐蠕动, 失去锁制功能。

本文论述的锁制器采用锁销式结构, 体积为  $\phi 34$  mm(直径)  $\times 16$  mm(长度)。该结构锁制器具有结构简单、控制简单、锁制力矩大等特点。该电机锁制器没有采用摩擦片形式, 而是拨销形式, 采用锁销限位, 受挂机振动影响很小, 锁制力矩变化小, 锁制能力稳定。该电机使用环境复杂, 使用周期长。为了保证长期使用的可靠性, 在锁制器设计上, 抛弃了传统的 10 号钢材料(易生锈, 防护要求高, 长期使用维护难度大), 采用不锈钢材料作为基体, 既具有 10 号钢的导磁性能, 又具有不锈钢的耐环境能力, 并利用该厂自有技术保证了锁制器的性能和可靠性, 做到长期使用免维护。

该锁制器能够在温度  $-55$  °C  $\sim 125$  °C、加速度  $100$  g、连续振动  $16$  h 等环境条件下稳定可靠地解制和锁制。

作者简介: 廖庆文(1983—), 男, 工程师, 研究方向为精密微特电机设计。

殷唯凯(1985—), 男, 工程师, 研究方向为精密微特电机设计。

陈强(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为精密微特电机电磁和结构设计。

## 1 锁销式锁制器的结构及工作原理

该锁制器电工作原理图如图 1 所示。

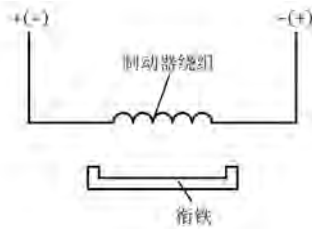


图 1 锁制器电原理图

该锁制器具有失电制动、通电解锁的功能，能稳定、可靠地实现制动和解锁的功能。锁制器工作原理：当给锁制器壳体组件中的锁制器绕组施加直流电压时，在绕组中就产生了电流，根据法拉第电磁感应定律可知，在绕组铁心中就形成了磁场并产生磁通。由于励磁电流为直流，故磁路中的磁通恒定不变，相当于一永久磁钢。该磁钢与衔铁（导磁材料）之间产生电磁力，当电磁力超过弹簧的弹力时，衔铁被电磁力吸回，锁销与制动盘脱离，在锁销与制动盘之间产生一定的运转间隙，电机不制动，即锁制器解锁；反之，即锁制器锁制。

该锁制器的结构主要由锁制器壳体组件、衔铁、定位套筒、制动盘、弹簧、端盖等零部件组合为一体。其结构简图如图 2 所示。锁制器壳体组件里安装有锁制器绕组，其主要作用是产生恒定磁场。衔铁由导磁材料加工而成，衔铁上加工有 2 个梯形锁销，通过衔铁的位置变动对制动盘进行锁制和解锁，而制动盘与电机轴通过键连接为一体。弹簧的作用主要是限制衔铁的初始位置，使得初始时衔铁处于锁制状态；锁制器绕组断电时，依靠自身弹力将衔铁推入锁制位置。其余零件均由不导磁材料加工而成。

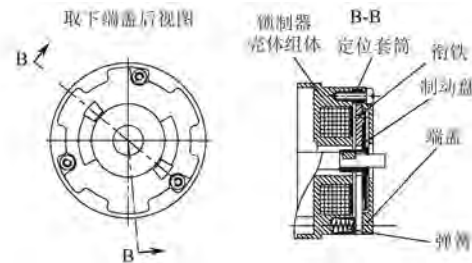


图 2 锁制器结构简图

## 2 电磁设计

### 2.1 电磁计算

为了保证锁制器可靠解锁，首先要保证锁制器绕组产生足够的电磁力，使得衔铁可靠吸合。制动器线径和匝数的确定对制动器性能的分析极为重要。在体积允许的前提下，利用理论公式计算出制动器的安匝数，确定制动器的线径和匝数。

制动器主要计算结果如下：

- (1) 衔铁质量为 0.01 kg。
- (2) 6 个弹簧的弹簧力： $f_1 = 6f_{s1} = 6 \times 0.5 \text{ N} = 3 \text{ N}$ 。
- (3) 衔铁在 100 g 加速度下产生的重力  $G_1 = 100 \text{ mg} = 9.8 \text{ N}$ 。
- (4) 衔铁在重量作用下与定位套筒之间产生的摩擦力  $f_1 = 3 \times 0.15 \times 0.01 \times 9.8 = 0.045 \text{ N}$ ， $\mu$  为材料干摩擦因数（钢-钢），取 0.15。

(5) 在最严酷的条件下解锁，即电磁力克服弹簧力、衔铁重力和摩擦力，最小电磁力总和为 12.845 N。最严酷的锁制条件下，弹簧的弹力（3 N）大于衔铁产生的重力（0.98 N），以保证在锁制器不通电的情况下，锁制器不会自行解锁。

(6) 电磁铁解锁吸合时，气隙长度为 0.7 mm，根据磁路磁密计算出需要的电磁绕组磁势  $F = 245 \text{ A}$ 。

(7) 按照最大电压 24 V，最大电流 0.27 A 考虑电阻为 88.89  $\Omega$ ，线圈总匝数  $N = 1\ 550$  匝；选取漆包线线径  $d_c = 0.14 \text{ mm}$ 。

### 2.2 电磁仿真

利用 Ansoft 有限元分析软件对制动器的磁场和磁密分布进行分析、比较，并分析了线径大小、气隙长度对磁场分布以及解锁力大小，针对磁场磁密高位置进行结构优化，确保磁场分布合理，分析结果为调整电磁参数提供了理论依据<sup>[1]</sup>。

采用 Ansoft 软件对锁制器性能进行仿真，如图 3~图 6 所示。

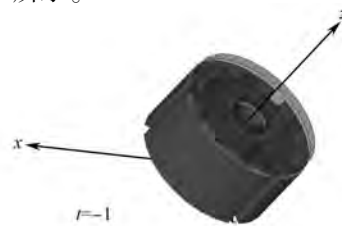


图 3 锁制器结构简图

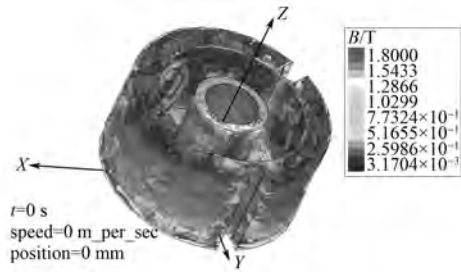


图4 制动器三维模型图

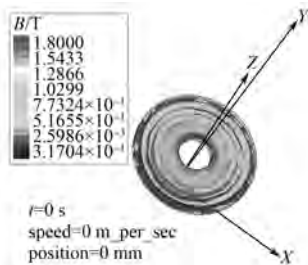


图5 锁制器壳体磁密仿真图

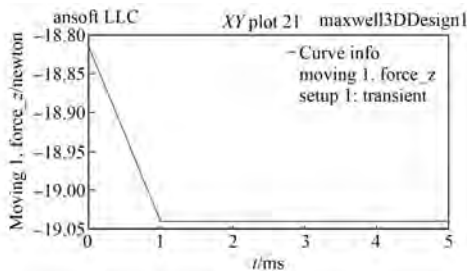


图6 锁制器产生的电磁力仿真图

通过仿真计算,解锁时,锁制器产生的电磁力为 18.8 N,大于最严酷解锁条件下需要的电磁力总和 12.845 N,选取的电磁参数能够保证锁制器产生的电磁力满足要求。

### 3 结构设计

锁制器最重要的功能为可靠地解锁和锁制。在研制过程中出现了以下故障。

(1) 由于结构中圆柱锁销被过度定位和限位,衔铁在锁销上滑动不灵活,被卡死,锁制器没有可靠解锁,导致电机长时间堵转而出现电机绕组烧毁。制动盘和衔铁改进前、后的结构对比图<sup>[2]</sup>如图7、图8所示。

(2) 由于锁销为圆柱销,制动盘与其点接触,剪切力大,工作时锁销与制动盘配合面被切削掉

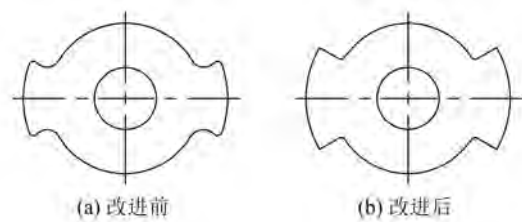


图7 制动盘改进前、后对比图

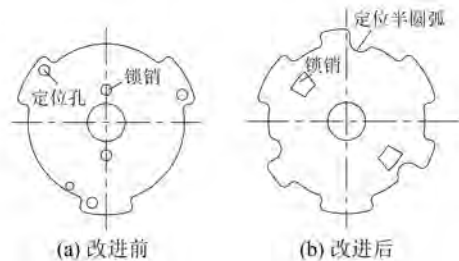


图8 衔铁改进前、后对比图

而失去锁制作用,出现部分电机制动盘从锁销上打滑的情况,不能可靠锁制<sup>[3]</sup>。

为解决故障,对锁制器结构进行了改进,完善了细节,锁制器结构已经过试验和实际应用的验证。下文分别对锁制器零部件结构设计要点和细节进行阐述。

#### 3.1 锁制器壳体组件

锁制器壳体组件结构简图如图9所示。

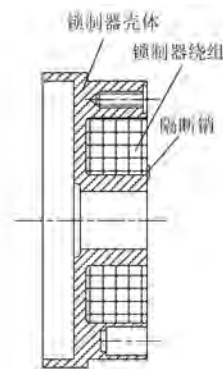


图9 锁制器壳体组件结构简图

(1) 锁制器壳体。锁制器壳体由导磁材料加工而成,是锁制器绕组的载体。在设计锁制器壳体时,除了保证正常磁路的尺寸外,应尽量增大安装锁制器绕组的腔体,以便安装更多的绕组,提高电磁力。由于锁制器绕组断电后,一定时间内,在锁制器壳体中还会剩余部分磁场,简称剩磁。

该剩磁将会继续产生电磁力,使衔铁不能脱开,电机不能制动。为了解决这一问题,在设计时可采用2种方法:(1)选择材料时,可采用电工纯铁,该材料为了防锈,需进行镀镍处理,镀镍前需预先镀铜,有了这一镀铜层,在锁制器绕组断电时,隔断了剩磁磁路,不能形成闭合磁路,不能产生电磁力,衔铁能瞬间脱开。(2)当选用不锈钢材料时,不需电镀处理,可在壳体表面增加若干隔断销,该隔断销不导磁,同样起到隔断剩磁磁路的作用。隔断销端面离壳体端面的间隙不必很高,通过对不同间隙的试验验证,选取高度0.05 mm即可满足加工和使用要求,如表1所示。本锁制器采用的是第2种方法,设置3个隔断销。

表1 不同隔断间隙下的消除剩磁影响效果

间隙/mm	效果	弊端
0.01	无效果,衔铁不能有效弹开	加工困难
0.02	无效果,衔铁不能有效弹开	加工困难
0.05	效果好,衔铁能可靠弹开	无
0.08	效果好,衔铁能可靠弹开	无
0.10 以上	效果好,衔铁能可靠弹开	将会导致锁制器保持解锁状态的能力下降

(2) 锁制器绕组。锁制器绕组设计时,除了考虑解锁必须的电磁力外,还要考虑锁制器绕组的发热、温升以及锁制器壳体绕组腔体的体积,此外,应尽量增大绕组匝数和线径,提高电磁力。

(3) 隔断销。隔断销起到隔断剩磁磁路的作用,应选用不导磁材料。理论上可选用无磁不锈钢或铜等材料,考虑到铜材料也会生锈等因素,该锁制器选用无磁不锈钢。

### 3.2 弹簧

弹簧的作用主要是限制衔铁的初始位置,使得初始时衔铁处于锁制状态。锁制器绕组断电时,依靠自身弹力将衔铁推入锁制位置。

弹簧设计要点如下:

(1) 在一定体积下,设计时,弹簧压力不能太大,也不能太小。弹簧压力太大,则没有足够电磁力使得弹簧屈服,不能解锁;或者,由于电磁力裕量不足,在强振动条件下,弹簧可能将衔铁顶开,在需要锁制器解锁时,锁制器锁制,电机堵转烧毁。弹簧压力太小,当要求锁制器锁制时,弹簧压力不能将衔铁推开,不能使锁制器锁制。弹簧压

力大小应在一定范围内选取。

(2) 弹簧材料应选取不锈钢丝或具有防锈能力的弹簧丝。

(3) 安装弹簧时,应进行弹簧压力筛选,选取压力一致性好的弹簧装配到同一台锁制器上,确保衔铁运动的稳定性。

### 3.3 衔铁

衔铁是锁制器中唯一运动的零件,衔铁的运动直接导致锁制器锁制和解锁,是锁制器的重要部件。衔铁结构如图10所示。

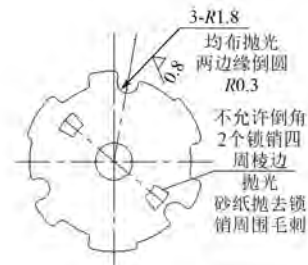


图10 衔铁结构简图

衔铁必须由导磁材料加工,在保证一定强度的前提下,导磁性能越强越好。该锁制器从防锈角度考虑,选择了不锈钢材料。在衔铁设计时,也可选用其他导磁材料。

衔铁运动是靠3个半圆孔进行定位和限位的,采用半圆孔后减少了多余的定位,并且使定位配合处圆弧过渡,消除棱边棱角,使得衔铁滑动更灵活、更自由,降低衔铁机械卡死的几率,因此设计时必须保证其具有较高的精度和光洁度。3个半圆孔的公差、位置度要求高且必须在圆周上均匀分布。半圆孔两边缘倒圆并抛光或研磨,减小粗糙度,保证衔铁运动的顺滑。

衔铁上2个锁销锁制时需要承受一定的转矩。为了提高锁销与制动盘的接触面积,锁销设计成梯形销,减小了锁销与制动盘配合处的剪切力,提高了可靠性。锁销四周棱边不允许倒角,用抛光砂纸抛去锁销周围毛刺。在工艺可行的基础上,可对2个锁销进行渗碳或渗氮处理,进一步提高锁销的强度。

### 3.4 定位套筒

为了不对正常磁路产生影响,定位套筒需由不导磁材料加工。定位套筒与衔铁半圆孔存在滑动配合,从防锈的角度考虑,该锁制器定位套筒选

用无磁不锈钢材料。

定位套筒与衔铁上半圆孔配合对衔铁进行定位和限位。为了保证一致性,定位套筒的直径公差要较小;为了保证配合光洁度,定位套筒外圆粗糙度要小,应采取磨加工的方法加工。

定位套筒的长度关系到衔铁与锁制器壳体之间的间隙,与解锁电压的大小有关,关系到锁制器解锁的可靠性,必须保证足够的尺寸精度。定位套筒的长度、衔铁与锁制器壳体之间的间隙将在下文详述。

### 3.5 制动盘

制动盘的结构简图如图 11 所示。

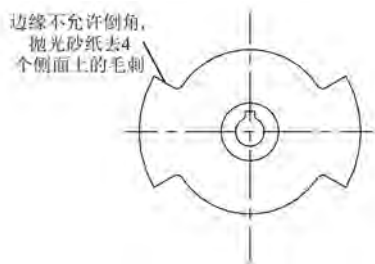


图 11 制动盘的结构简图

为了不对正常磁路产生影响,制动盘需由不导磁材料加工,从防锈的角度考虑,该锁制器制动盘选用无磁不锈钢材料。

制动盘通过键连接固定在电机旋转轴上,与衔铁上 2 个锁销配合对电机进行锁制和解锁。制动盘的结构根据衔铁的锁销结构进行设计,锁制时需要承受一定的转矩,制动盘与锁销配合处采用面接触,提高了锁销与制动盘的接触面积,减小了锁销与制动盘配合处的剪切力,提高了可靠性。制动盘侧面棱边不允许倒角,并用抛光砂纸抛去锁销周围毛刺。

### 3.6 端盖

为了不对正常磁路产生影响,端盖需由不导磁材料加工,另外从强度和防锈的角度考虑,端板应选择无磁不锈钢材料。但是由于受到重量的限制,该锁制器端盖选用超硬铝材料加工,兼具高强度、防锈、不导磁的特点。在重量允许时,端盖材料可选取无磁不锈钢加工。

从图 2 可知,端盖将定位套筒、衔铁、锁制器壳体组件连接在一起。为了保证配合可靠性,对端盖配合面需要有较高的形位要求。

由于锁制时衔铁与端盖贴合在一起,所以在特殊环境条件下,材料选取应通过验证(如太空条件下会出现冷焊现象)。

## 4 设计要点

锁制器解锁时,在锁制器绕组不变的前提下,解锁电压的大小受衔铁到锁制器壳体表面的距离影响很大,即受到图 12 中的  $\delta_1$  的影响。该尺寸属于装配尺寸,采用该结构形式后,定位套筒的长度与衔铁的厚度之差即衔铁到锁制器壳体表面的距离,只要控制了定位套筒的长度和衔铁的厚度,就控制了间隙  $\delta_1$ 。定位套筒和衔铁均属于零件,可以得到精确控制,这也是为何要把定位套筒长度公差设计得很严的原因。

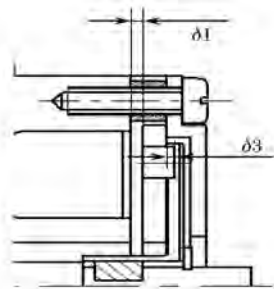


图 12 制动时的间隙示意图

锁制器锁制时,锁销受到力矩作用。为了提高锁制可靠性,应尽量增大锁销与制动盘的配合高度,即图 12 中的  $\delta_3$ 。该高度属于装配尺寸且不利于测量,从图 12、图 13 可知,间隙  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  组成闭合尺寸链,只要保证间隙  $\delta_1$  和  $\delta_2$ ,间隙  $\delta_3$  自然得到保证。

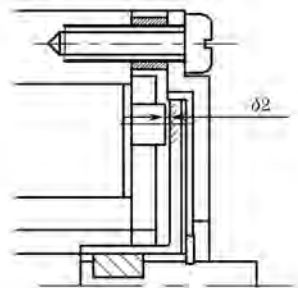


图 13 解锁时的间隙示意图

如图 13 所示,锁制器解锁后,用塞尺可直接测量制动盘与锁销之间的间隙  $\delta_2$ ,通过调整制动盘在轴上位置,可以调整间隙  $\delta_2$ 。

(下转第 67 页)

6/13DSLFSM-CST1的推力平均值最大,这是由于三相反电动势的平衡可以增强电机的推力输出能力。从图 9 (b) 和图 9 (c) 可以发现,6/13DSLFSM-CST1 的推力脉动最小,约为 14.8%,这由于三相反电动势的平衡不但可以提高推力输出能力,还可以减小推力脉动。

#### 4 结 语

与单边 LFSPM 电机相比,DSLFSM 电机不但可以继承其推力输出能力,而且具有较小的法向力。本文研究的基于次级错齿的 C 型铁心 DSLFSM 电机具有如下优点:(1)与单边结构一样,具有较高的推力输出能力。(2)通过次级错齿结构有效地减小了电机的定位力,从而减小了电机推力脉动。(3)通过端部永磁体结构有效地平衡三相反电动势,从而提高了电机推力输出能力并进一步减小了推力脉动。综上所述,该电机具有较高的推力输出能力和较低的脉动,适用于长次级场合,如智能电梯、轨道交通等。

#### 【参考文献】

- [ 1 ] 徐月同,傅建中,陈子辰.永磁直线同步电机推力波动优化及实验研究[J].中国电机工程学报,2005,25(12): 122-127.
- [ 2 ] MA W Z, ZHANG H M, SUN J Y, et al. Research on the design of linear drive motor of new pumping unit [J].Adv Mater Res,2011(383/390): 1391-1398.
- [ 3 ] KYOUNG K Y, GWAM G B, SPIMG J I, et al. Analysis and design of slotted tubular linear actuator for the eco-pedal system of a vehicle[J].IEEE Trans Magn,2012,48(2): 939-942.
- [ 4 ] WANG C, SHEN J, WANG Y. A novel permanent magnet flux-switching linear motor [ C ] // 4th IET

Conference on Power Electronics, Machines and Drives,2008:116-119.

- [ 5 ] 郝雯娟,邓智泉.一种基于分段定子的直线永磁磁通切换电机结构及其优化方法[J].电机与控制应用,2015,42(12): 1-6.
- [ 6 ] 吉敬华,刘文庆,赵文祥.模块化开关磁链永磁直线电机的分析与控制[J].电机与控制应用,2014,41(1): 5-7.
- [ 7 ] HAO W J, WANG Y, DENG Z Q. Study of two kinds of double-sided yokeless linear flux-switching permanent magnet machines [ C ] // Presented at the 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Hangzhou, 2016: 1-6.
- [ 8 ] CAO R W, HUANG W X, CHENG M. A new modular and complementary double-sided linear flux-switching permanent magnet motor with yokeless secondary [ C ] // Int Conf Electrical Machines and Systems (ICEMS' 2014), Hangzhou, 2014: 3648-3652.
- [ 9 ] LIU Q, YU H T, HU M Q, et al. Cogging force reduction of double sided linear flux-switching permanent magnet machine for direct drives [ J ]. IEEE Trans Magn, 2013, 49(5): 2275-2278.
- [ 10 ] KROP D, ENCICA L, LOMONOVA E. Analysis of a novel double sided flux switching linear motor topology [ C ] // XIX International Conference on Electrical Machines, 2010: 1-5.
- [ 11 ] 黄磊,胡敏强,刘静,等.双边长初级磁通切换永磁直线电机推力波动分析及抑制[J].电工技术学报,2014,29(11): 10-19.
- [ 12 ] MIN W, CHEN J T, ZHU Z Q, et al. Optimization and comparison of novel e-core and c-core linear switched flux PM machines [ J ]. IEEE Trans Magn, 2011, 47(8): 2134-2141.

收稿日期: 2018-03-26

(上接第 49 页)

装配锁制器时,每台锁制器通过检测和调整各种气隙,可以保证各种气隙在可控范围内,保证锁制器可靠解锁和制动。

#### 5 结 语

锁销式锁制器各零部件通过优化设计和通过结构改进、细节优化、细节控制后明显提高了锁制器在恶劣环境条件下的可靠性。该成果应用在某舵机上,取得了良好的效果,对类似结构锁制器设计具有借鉴作用。

#### 【参考文献】

- [ 1 ] 电机工程手册编委会.电机工程手册[M].北京:机械工业出版社,1979.
- [ 2 ] 于惠利,潘承怡,向敬忠,等.机械零部件设计禁忌[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [ 3 ] 张子忠.微电机结构工艺学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.

收稿日期: 2018-03-25