

车用驱动电机定子与机壳过盈联接分析

许明华, 宋丽花

(上海汽车电驱动有限公司, 上海 201806)

摘要: 车用驱动电机定子与机壳多采用过盈联接, 合适的过盈量需要兼顾多方面需求。通过理论计算和有限元方法, 考虑实际应用中的高低温工况, 对设计过盈量下的联接强度及传递转矩进行校核。然后, 通过仿真分析得到机壳止口变形量, 并结合实测数据, 进一步验证有限元方法可靠性。提供了一种过盈量有限元校核方法, 可指导驱动电机定子组件过盈量和止口配合公差的设计。

关键词: 驱动电机; 过盈联接; 强度; 传递转矩; 止口变形

中图分类号: TM 303 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)11-0062-06

doi: 10.12177/emca.2020.138

Analysis of Interference Fit Between Stator and Housing of Vehicle Drive Motor

XU Minghua, SONG Lihua

(Shanghai Automotive Edrive Co., Ltd., Shanghai 201806, China)

Abstract: Interference fit is mostly used between the stator and housing of vehicle driving motor, and the appropriate interference amount needs to meet various requirements. Through theoretical calculation and finite element method (FEM), considering the high and low temperature conditions in practical application, the connection strength and transmission torque under the design interference are checked. Then, through the simulation analysis, the deformation of housing rabbet is obtained. In combination with the measured data, the reliability of the FEM is further verified. The finite element checking method for interference can guide the design of the interference fit of stator assembly and the tolerance of housing rabbet of driving motors.

Key words: driving motor; interference fit; strength; transmission torque; rabbet deformation

0 引言

车用驱动电机定子与机壳多采用过盈联接。过盈配合面为圆柱面, 过盈联接的承载能力取决于联接中各零件的强度和联接的固持力。过盈联接有结构简单、对中性好等优点, 但驱动电机的振动工况、工作温度等均对电机定子与壳体的实际过盈量有很大影响^[1]。本文将从驱动电机的不同温度工况分析过盈联接强度及传递扭矩可靠性。

为了评估过盈联接的性能, 文献[2]提出了影响过盈联接性能的多种因素, 包括过盈量、摩擦系数、温度等。文献[3-4]提出一种基于有限元

方法的考虑温度工况的电机壳体与定子过盈量选取方法。文献[5]提出了在一定温度场下, 止口连接结构实际过盈量理论损失高达63%, 因此设计过盈联接过盈量时, 除了考虑上述提到的联接件强度和传递转矩外, 还需密切关注机壳止口处的变形情况, 为了保证机壳与端盖的装配精度, 需要根据止口变形量调整止口配合公差。

本文为电机设计阶段选择合适过盈量和止口配合公差提供一种验证方法。以某型电机为分析对象, 通过理论计算和有限元方法, 对设计过盈量下的过盈联接强度及传递转矩可靠性进行校核, 并考虑应用中的高低温工况对过盈联接的影响。

收稿日期: 2020-07-06; 收到修改稿日期: 2020-09-01

作者简介: 许明华(1990—), 女, 硕士, 研究方向为新能源动力系统结构可靠性分析及轻量化设计、热管理CFD分析及优化等。

最后,仿真分析机壳止口变形量,结合实测数据,对有限元方法进行验证。

1 几何模型

以某型电机为例,常温条件下,根据配合尺寸、加工精度和经验数据等选择合适的公差带,得到结构最小设计过盈量 $\delta_{\min} = 0.17 \text{ mm}$,最大设计过盈量 $\delta_{\max} = 0.229 \text{ mm}$ 。电机几何模型的主要结构如图 1 所示。

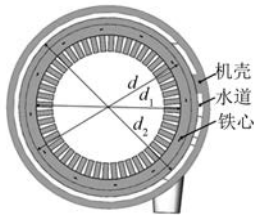


图 1 电机几何模型主要结构

过盈配合的公称直径 d 为定子外径,配合长度 l 为铁心长度,被包容件内径 d_1 为铁心轭部内径,包容件外径 d_2 为机壳水道内壁直径,主要结构参数如表 1 所示。

表 1 主要结构参数 mm

配合公称直径 d	配合长度 l	被包容件内径 d_1	包容件外径 d_2
180	124	156.7	194

机壳两端止口配合如图 2 所示。止口 1 直径为 189 mm,止口 2 直径为 180 mm。

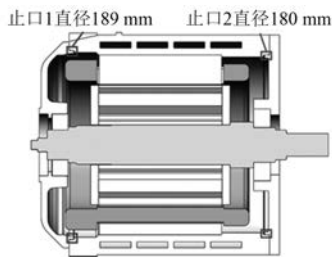


图 2 止口配合

定子材料为硅钢片,型号 B35AV1900,机壳材料 A356,相关材料参数如表 2 所示。

为了保证过盈联接的工作能力,强度计算须包含 2 个方面:(1)在设计过盈量内,校核联接零件在最大过盈量时的强度;(2)在设计过盈量内,校核最小过盈量下传递工作载荷即转矩的可

靠性。

表 2 材料参数

材料 牌号	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	热膨胀系数/ (10^{-5} K^{-1})
B35AV1900	7 650	165	0.27	1.10
A356	2 660	69	0.33	2.08

2 过盈联接强度计算

2.1 解析法

计算假设:(1)零件应变在弹性范围内;(2)被联接件是 2 个等长的厚壁圆筒,配合面的压力是均匀分布的。

根据圆柱面过盈联接中传递载荷所需要得最小载荷计算^[6]和过盈量,可计算得到配合面间压强 p 为

$$p = \frac{\delta}{d \cdot (C_1/E_1 + C_2/E_2)} \quad (1)$$

式中: δ 为过盈联接的过盈量; d 为配合的公称直径; C_1 、 C_2 为被包容件的刚性系数, $C_1 = \frac{d^2 + d_1^2}{d^2 - d_1^2} - \mu_1$, $C_2 = \frac{d^2 + d_2^2}{d^2 - d_2^2} + \mu_2$; E_1 、 E_2 分别为被包容件与包容件材料的弹性模量; d_1 、 d_2 分别为被包容件的内径和包容件的外径; μ_1 、 μ_2 分别为被包容件与包容件材料的泊松比。

根据圆柱面过盈联接的应力及强度计算^[6],应力分布如图 3 所示。图 3 中, σ_1 为周向应力, σ_3 为径向应力。

根据圆柱面过盈联接的应力及强度计算^[6],应力分布如图 3 所示。图 3 中, σ_1 为周向应力, σ_3 为径向应力。

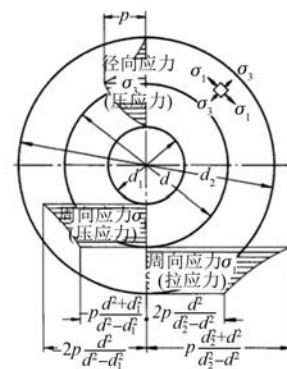


图 3 过盈联接零件的应力图

由式(1)可知,当过盈量 δ 达到最大过盈量 δ_{\max} 时,配合面间压强 p 达到最大值 p_{\max} ,联接件

的应力最大,因此按最大过盈量来校核联接件强度。当零件材料为塑性材料时,根据第三强度理论,应满足强度条件 $(\sigma_1 - \sigma_3) \leq \sigma_s$, σ_s 是材料的屈服极限。

σ_{s1} 、 σ_{s2} 分别为被包容件及包容件材料的屈服极限,则由图 3 可知,不出现塑性变形的校验如下。

(1) 对包容件,危险应力发生在内表面处,该处 $\sigma_1 = p \frac{d_2^2 + d^2}{d_2^2 - d^2}$, $\sigma_3 = -p$, 因此强度条件为

$$\frac{2pd_2^2}{d_2^2 - d^2} \leq \sigma_{s2} \quad (2)$$

(2) 对被包容件,危险应力发生在内表面处,

该处 $\sigma_1 = -\frac{2pd^2}{d^2 - d_1^2}$, $\sigma_3 = 0$, 因此强度条件为

$$\frac{2pd^2}{d^2 - d_1^2} \leq \sigma_{s1} \quad (3)$$

2.2 有限元法

为了验证有限元法和解析法的一致性,简化分析模型如图 4 所示。外圆环为机壳,内圆环为定子。

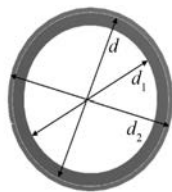


图 4 简化模型

按最大过盈量 0.229 mm 核算,图 5(a) 为机壳周向应力分布云图,机壳内表面周向应力最大,为拉应力,最大应力值为 72.24 MPa。图 5(b) 为机壳径向应力分布云图,机壳内表面径向应力最大,为压应力,最大应力值为 5.43 MPa。

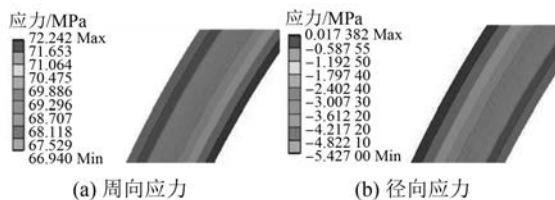


图 5 机壳应力分布云图

表 3 为最大过盈量下机壳联接强度校核,机壳材料 A356,屈服强度 $\sigma_s = 185$ MPa。

由表 3 可知,机壳可以满足强度要求。解析法和有限元法结果进行对比,误差较小,约为 2.3%,可见,有限元法计算过盈联接是可靠的。

表 3 机壳过盈联接强度校核 MPa

方法	接触应力	周向应力	径向应力	强度校核
	p_{max}	σ_{1max}	σ_{3min}	$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq \sigma_s$
解析法	5.28	70.6	-5.28	75.88
有限元法	5.38	72.24	-5.43	77.67

图 6 为机壳周向应力从内表面(1 点)到外表面(2 点)的变化,周向应力从内表面到外表面逐渐递减。由上述结果可知,有限元计算结果和分布趋势与解析法一致。

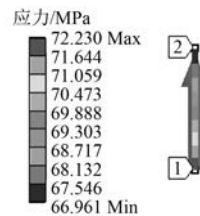


图 6 机壳周向应力随位置变化

2.3 低温条件下强度校核

根据上述简化模型解析法和有限元法强度计算的对比,可验证有限元法的准确性。对于复杂的电机模型,有限元法优势更为明显。

根据 GB/T 18488.1—2015《电动汽车用驱动电机系统 第 1 部分:技术条件》中 5.6 环境适应性要求,驱动电机应能承受 -40 °C、持续 2 h 的低温贮存^[7]。在此条件下,机壳与铁心几乎均达到 -40 °C,机壳收缩严重,配合过盈量会增大,机壳应力也将明显增大。以下基于有限元法,分析在低温条件下,定子组件过盈量的变化,并校核机壳的强度。

在最大过盈量 0.229 mm 下,常温 20 °C 和低温 -40 °C 贮存条件下的接触应力分布云图如图 7 所示。由图 7 可知,低温影响后的接触应力明显增加,最大接触应力从 79.6 MPa 增加到 116.5 MPa,平均接触应力从 11 MPa 增加到 16 MPa。

由以上分析可知,电机低温贮存会导致过盈量增大,需要在低温条件下校核机壳的联接强度。

图 8 为机壳应力分布云图,常温 20 °C 条件下机壳的最大应力为 126 MPa,低温 -40 °C 条件下

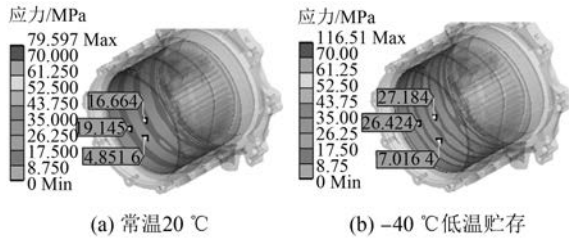


图7 接触应力

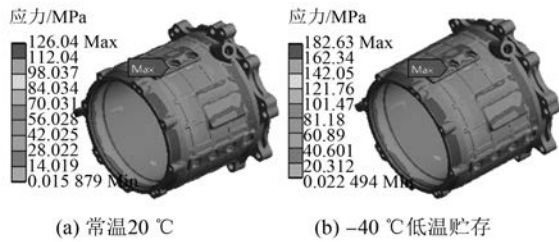


图8 机壳应力分布云图

机壳的最大应力为 183 MPa。

表 4 为最大过盈量 0.229 mm 条件下联接件应力分析结果。机壳最大应力小于材料的屈服强度 185 MPa, 可以满足强度要求。

表 4 联接件应力结果

温度情况	机壳温度/°C	定子温度/°C	平均接触应力 p /MPa	机壳最大应力 σ /MPa
常温	20	20	11	126
低温	-40	-40	16	183

3 传递转矩可靠性计算

3.1 电机常温状态

过盈联接在保证联接件强度的基础上, 还要有足够的固持力以保证在最大工作载荷下不发生周向相对滑动, 即在设计时需要考虑传递转矩可靠性。当接触应力为 p 时, 配合面间所能产生的摩擦阻力矩 M_f 应大于或等于电机峰值扭矩 $T_{max} = 170 \text{ N}\cdot\text{m}$, 即保证 $M_f \geq T$, 并有一定的安全余量。

取配合面上的摩擦系数为 $f = 0.15^{[4]}$, 配合尺寸同前, 则:

$$M_f = \pi d l p f \frac{d}{2} \quad (4)$$

由式(4)可知, 接触应力 p 达到最小值 p_{min} 时, 配合面产生的摩擦阻力矩 M_{fmin} 最小, 当 M_{fmin}

$\geq T_{max}$ 时, 即能保证电机在任何过盈量下均能有效传递转矩, 不发生相对滑移。

由式(1)可计算得, 最小过盈量 0.17 mm 下接触应力 p_{min} 为 3.92 MPa, 该接触应力下根据式(6), 计算得配合面可以产生的摩擦阻力矩 M_{fmin} 为 3 708 N·m。

利用有限元法, 在常温 20 °C 条件下, 机壳接触应力分布云图和摩擦阻力矩如图 9 所示。由于机壳结构复杂, 仿真计算得到配合面接触应力分布不均匀, 这是理论计算无法模拟的。由图 9(a) 可知, 最大接触应力约为 59 MPa, 水道配合面处接触应力约为 3.56 MPa, 与理论计算一致。图 9(b) 中, 第 1 s 施加过盈量, 第 2 s 施加沿机壳外壁的周向位移, 此时可得到摩擦阻力矩 M_f 为 6 943 N·m, 可以满足传递转矩要求。

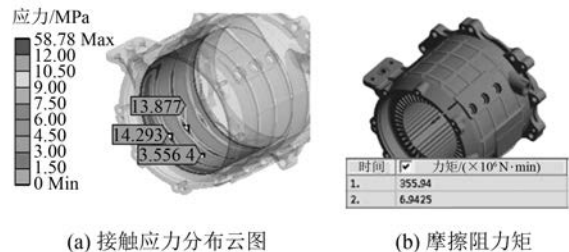


图9 电机常温状态接触应力和摩擦阻力矩

由于机壳材料热膨胀系数明显大于定子, 在高温工况下, 机壳膨胀量更大, 配合面间过盈量会减小, 接触应力降低, 可能会出现摩擦阻力矩小于电机峰值扭矩的情况, 不能有效传递转矩, 因此需要判断温度影响之后的实际过盈量是否满足使用要求。

3.2 电机高温工况

高温贮存工况: 根据 GB/T 18488.1—2015《电动汽车用驱动电机系统 第 1 部分: 技术条件》中 5.6 环境适应性要求, 驱动电机应能承受 85 °C、持续 2 h 的高温贮存试验^[7]。在此条件下, 机壳与铁心几乎均达到 85 °C。该工况下要求配合面仍存在一定过盈量, 有剩余接触应力。

高温运行工况: 根据 GB/T 18488.1—2015《电动汽车用驱动电机系统 第 1 部分: 技术条件》中 5.6 环境适应性要求, 由产品的安装部位确定该驱动电机应能承受 65 °C 的高温工作试验^[7]。电机运行过程中会有较大的发热量, 稳态运行时, 定子和机壳呈现一定的温度分布。根据电机运行

工况的温升试验结果,机壳的平均温度约为 75 ℃,定子轭部的平均温度约为 90 ℃。该工况下要求配合面可传递的摩擦阻力矩 M_f 大于电机峰值转矩,并有一定的安全余量。

表 5 为最小过盈量 0.17 mm 条件下应力数据和传递转矩校核结果。根据表 5 可知,3 种工况下,最小过盈量下可传递的摩擦阻力矩 M_f 远大于电机峰值转矩,可以满足使用要求。

表 5 过盈传递转矩结果

工况	机壳 温度/℃	铁心 温度/℃	平均接触应力 p /MPa	摩擦阻力矩 M_f /(N·m)
常温工况	20	20	8.17	6 943
高温贮存	85	85	2.15	1 956
高温工作	75	90	4.38	3 953

4 机壳止口变形分析与实测

定子组件在热套后,机壳和定子均会发生变形,机壳止口处的变形会影响与端盖的配合,影响电机的同轴度,从而影响电磁性能,导致振动噪声等问题。

设计阶段,在最大最小过盈量均能满足联接强度和传递转矩的基础上,通过分析该过盈量范围内机壳止口变形量,根据止口变形量选择合适的止口配合公差,以避免在装配过程中出现止口干涉问题,同时可以保证电机的同轴度。

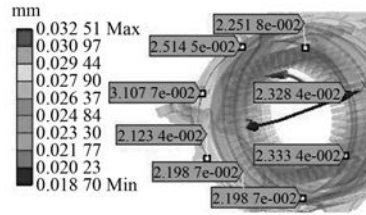
4.1 机壳止口变形仿真计算

按照设计过盈量 0.170~0.229 mm,可仿真分析得到过盈前后机壳止口处的变形情况,距离定子端面较近的 189 mm 止口直径向外膨胀,距离定子端面较远的 180 mm 止口直径向内收缩,径向变形如图 10 所示。

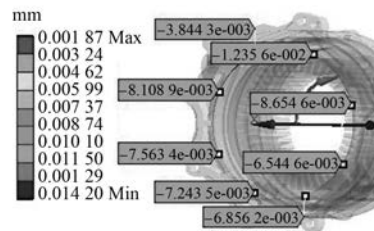
4.2 机壳止口变形实测

热套前后定子与机壳的尺寸采用三坐标测量仪进行测量记录,在热套前测量定子外径、机壳定子档直径、机壳止口直径,测量后进行过盈装配,并记录实际过盈量。热套后测量定子组件止口处的直径,三坐标测量如图 11 所示。测量时在圆周内一圈选择 12 个均布的测点记录坐标值,软件采用最小二乘法计算得到实际的测量直径。

表 6 为不同过盈量下机壳止口径向变形量仿



(a) 189 mm 止口



(b) 180 mm 止口

图 10 仿真止口径向变形量



图 11 三坐标测量

真与实测数据对比。

表 6 机壳止口变形量

变形量	仿真	实测 1	实测 2
过盈量	0.170 0~0.293 0	0.213 2	0.226 1
189 mm 止口	0.032 8~0.054 0	0.034 8	0.047 5
180 mm 止口	-0.008 3~-0.019 6	-0.015 8	-0.016 5

由表 6 实测数据可看出,189 mm 止口变形量为正,即直径向外膨胀;180 mm 止口变形量为负,即止口直径向内收缩,与仿真结果变化趋势一致。实测止口变形量在仿真止口变形量范围内,可见有限元分析方法在计算止口变形量是可靠的,设计时应根据止口变形量选择合适的止口配合公差。

5 结 语

车用驱动电机机壳与定子采用过盈配合,高温工况对过盈联接强度和传递转矩影响较大,

因此在设计过盈量时,应该考虑电机在常温和不同温度工况下的联接件结构强度和传递工作载荷的可靠性。

由分析可得以下结论:

(1) 在低温贮存工况下,机壳与定子过盈量、接触应力、联接件应力增大,因此需要校核低温工况,最大过盈量下的联接件结构强度。

(2) 在高温贮存和高温运行工况下,机壳与铁心之间过盈量减小,接触应力减小,配合面传递转矩能力减弱,因此需要校核高温工况,最小过盈量下的传递转矩可靠性。

(3) 过盈配合会导致机壳止口径向尺寸发生变化,径向直径可能增大或减小,取决于定子端面到止口的距离,设计时应根据止口变形量选择合理的止口配合公差。

建议在设计阶段充分考虑上述因素,给出合适的结构过盈量和止口配合公差。通过理论计算和与实测对比,本文所提过盈量有限元校核方法切实可行,可指导驱动电机定子组件过盈量和止

口配合公差的设计。

【参考文献】

- [1] 林巨广,杨炎平.基于电机定子与壳体过盈配合的噪声分析[J].汽车技术,2019(3): 31.
- [2] 陶德峰.多层圆筒过盈连接设计方法及试验研究[D].太原:太原科技大学,2013.
- [3] 张振军,蔡蔚.一种汽车电机壳体和定子之间过盈量仿真方法[C]//2013 中国汽车工程学会年会论文集,2013: 171.
- [4] 谭立真.基于温升的纯电动大巴驱动电机定子与壳体过盈配合研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [5] 杨阳,罗忠,刘永泉.热载荷对止口连接结构过盈量的影响分析[J].航空发动机,2019,45(2): 1.
- [6] 邱宣怀.机械设计[M].4版.北京:高等教育出版社,2011.
- [7] 中国国家标准化管理委员会.电动汽车用驱动电机系统 第1部分:技术条件:GB/T 18488.1—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.

◎广告◎

四川宜宾力源电机有限公司

为了适应公司技术持续创新、经济规模不断扩大的迫切需要,诚聘电机行业人才!

1、电机设计工程师 3 人

任职要求:工业电机制造行业工程技术岗位 5 年以上。

2、电机工艺工程师 3 人

任职要求:工业电机制造行业工程技术岗位 3 年以上。

3、生产、质量管理工程师 2 人

任职要求:工业电机制造行业生产、质量管理岗位 3 年以上(有 6 σ 管理经验者优先)。

4、销售工程师(销售经理)2 人

任职要求:工业电机销售岗位 3 年以上,具有国际贸易经验、熟练英语口语交流能力者优先,可带团队加入。

待遇:

1、具有市场竞争力的薪资待遇,具体面议;

2、五险一金,双休;

3、公司安排小区环境住房;

4、协助子女入学;

5、解决配偶就业;

6、省外人才春节假期多休五天;

7、就业 5 年且有突出贡献的人员,公司额外予以丰厚奖励。

公司地址:四川省宜宾市叙州区盐坪坝工业园 1 号

电话:0831-2400330

网址:www.yblydj.cn

邮箱:yblydj@126.com

扫码关注公众号

