

# 关于大容量高速立式电机加装大转动惯量飞轮的设计研究

廖小兵, 安震东

(兰州电机股份有限公司, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 电机在发生事故突然失电时, 为确保系统安全, 要求电机能拖动设备依靠自身惯量, 继续运转 2 min。由于电机自身惯量远小于系统惯量要求, 因此需在电机本体上加装大直径、大重量飞轮, 以提供足够的惯量。在大容量、高速立式电动机加装大转动惯量飞轮后, 电机的稳定运行变得至关重要, 因此对电机自身的刚度、轴系及结构设计的合理性需进行验证。针对电机的关键点结构设计及计算, 并通过现场运行, 对电机的可靠性进行了验证。这为电机的工程运用提供参考。

**关键词:** 大转动惯量飞轮; 结构设计; 运行可靠性

**中图分类号:** TM 302    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0090-04

## On the Large Capacity High Speed Vertical Motor with Large Inertia Flywheel Design Research

LIAO Xiaobing, AN Zhendong

(Lanzhou Electric Corporation, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Sudden loss of power, the motor in the accident in order to ensure the system safety, motor could drag equipment rely on their own inertia, continue to run 2 minutes. Due to inertia was far less than the system inertia motor itself demand, so need to be on the machine body with large diameter, large flywheel weight, in order to provide enough moment of inertia. In large capacity and high speed vertical motor equipped with big moment of inertia of the flywheel, the stable operation of the motor becomes very important, therefore, shafting on stiffness of the machine itself and the rationality of the structure design should be validated. Aiming at the key points of the motor structure design and calculation, and through the real machine field operation. Verified the reliability of the motor. To provide the reference for electrical engineering application.

**Key words:** big moment of inertia of the flywheel; structure design; reliable operation

## 0 引言

YSKLPT5600-6TH 5 600 kW、10 kV, 转速 990 r/min 立式水空冷异步电动机是为钠泵研制的配套用驱动电机, 电机容量大, 转速高。为保证系统安全, 系统要求电机在事故失电情况下, 电机带动钠泵需具备 2 min 惰转能力, 即电机在失电后需靠惯量继续运转 2 min。

由于电机外拖阻尼矩大, 为满足惰转要求, 经

计算电机需提供  $6\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^2$  的转动惯量, 而高速电机因受电磁及结构限制, 自身只具备  $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^2$  的转动惯量。为此, 设计时需在高转速立式电动机转轴上加装大直径、大质量的飞轮, 由飞轮提供  $5\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^2$  的转动惯量。

高转速立式电动机加装大直径、大质量飞轮, 失电后电机依靠自身惯量运转工作。该类电机在国内各电机生产企业均处在研制阶段。

为确保系统的安全与稳定, 在加装飞轮后电

作者简介: 廖小兵(1968—), 男, 工程师, 研究方向为大中型电机设计。

安震东(1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电机应用策略。

机应确保自身的运行可靠性,故针对电机电磁、结构等方面多次进行了优化。

1 加装飞轮的设计策略

为尽可能增大电机自身转动惯量同时兼顾加装飞轮后电机的安装调试的便捷,设计时增大了电机机座号,定子铁心外径采用 1 600 mm。(常规电机定子铁心外径为 1 400 mm)<sup>[1]</sup>。

1.1 电磁计算后的电机性能参数及外形

- 电机型号: YSKLPT5600-6TH 5 600 kW、10 kV。
- 额定功率: 5 600 kW。
- 额定电压: 10 kV。
- 额定电流: 368.5 A。
- 额定频率: 50 Hz。
- 转速范围: 990 r/min。
- 效率≥95.5%,设计值 97.37%。
- 功率因数≥0.88,设计值 0.901。
- 堵转电流倍数≤6.5,设计值 5.59。
- 堵转转矩倍数≥0.8,设计值 1.12。
- 最大转矩倍数≥1.8,设计值 2.28。
- 绝缘等级:F。
- 电机自身转动惯量:1 000 kg·m<sup>2</sup>。
- 电机带飞轮转动惯量≥6 500 kg·m<sup>2</sup>。
- 电机带飞轮总重:45 t。
- 电机加装飞轮外形图如图 1 所示。

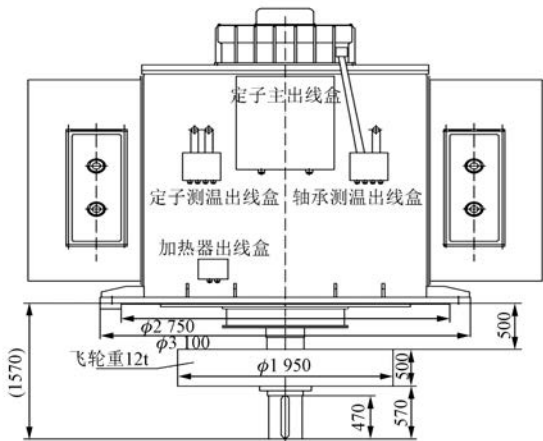


图1 电机加装飞轮外形图

1.2 飞轮惯量

电机主轴下端加装直径 1 950 mm、厚度为 500 mm、重量为 12 t 的锻钢飞轮。  
经计算飞轮转动惯量为

$$J = \frac{1}{32} \pi D^4 b r = 5\,570 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \tag{1}$$

满足由飞轮提供 5 500 kg·m<sup>2</sup>转动惯量的要求。同时为满足检修时飞轮的拆装,飞轮与主轴采用过渡配合。

1.3 转轴计算

为确保电机下端加装飞轮后运行的稳定,设计时兼顾安装调试空间位置,尽可能的缩短电机上导轴承、下导轴承及飞轮间距,满足轴系计算要求<sup>[2]</sup>。转轴临界转速计算结果如表 1 所示。

表 1 转轴临界转速计算结果

| 参数名称            | 参数值         | 参数名称                                   | 参数值         |
|-----------------|-------------|----------------------------------------|-------------|
| $L_1/\text{cm}$ | 134         | $J/\text{cm}^4$                        | 9 7631.67   |
| $L_2/\text{cm}$ | 136         | $J/\text{cm}^4$                        | 9 7631.67   |
| $L_4/\text{cm}$ | 70          | $N_t/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 1 100       |
| $D_{L1}$        | 0.738 326 8 | $D_{L4}$                               | 1.602 941   |
| $G_2/\text{kg}$ | 15 000      | 临 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 1 401.626   |
| $G_1/\text{kg}$ | 8 500       | 临 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ | 1 401.626   |
| $L/\text{cm}$   | 270         | $K/\text{倍}$                           | 1.274 206   |
| $D_{L2}$        | 0.586 318 4 | $FI$                                   | 0.374 019 1 |

1.4 结构策略

由于电机直径的放大,考虑到转子在高速运行时离心力的增加,为满足运行时电机转子强度要求,所以通过对结构强度计算,需在转子设计时新开相关模具,增加特殊材质的护环<sup>[3]</sup>。护环结构尺寸如图 2 所示。

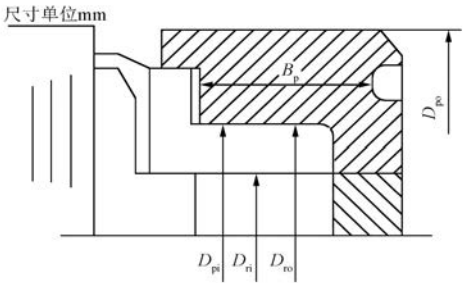


图2 护环结构尺寸

1.4.1 护环及端环尺寸

- 护环外径:  $D_{po} = 1\,104 \text{ mm}$ ;
- 护环内径:  $D_{pi} = 931 \text{ mm}$ ;
- 护环宽度:  $B_p = 21 \text{ mm}$ ;
- 端环外径:  $D_{ro} = 933 \text{ mm}$ ;
- 端环内径:  $D_{ri} = 813 \text{ mm}$ 。

$$\alpha_p = \frac{D_{pi}}{D_{po}} = \frac{933}{1\ 104} = 0.845 \quad \alpha_r = \frac{D_{ri}}{D_{ro}} = \frac{813}{933} = 0.871$$

#### 1.4.2 护环及端环的柔度

护环的柔度(在护环上幅向力的总和等于 1 N 时,护环内径的变化):

$$\lambda_p = \frac{1.55 \times 10^{-6}(\beta_{pl} + 0.27)}{B_p} = \frac{1.55 \times 10^{-6}(5.993 + 0.27)}{21} = 0.46 \times 10^{-6} \text{ mm/N} \quad (2)$$

$$\text{其中: } \beta_{pl} = \frac{1 + \alpha_p^2}{1 - \alpha_p^2} = \frac{1 + 0.845^2}{1 - 0.845^2} = 5.993$$

端环的柔度(在护环上幅向力的总和等于 1 牛时,端环外径毫米的变化):

$$\beta_r = \frac{2.7 \times 10^{-6}(\beta_{rl} - 0.27)}{B_R} = \frac{2.7 \times 10^{-6}(7.297 - 0.27)}{58} = 0.327 \times 10^{-6} \text{ mm/N} \quad (3)$$

$$\text{其中: } \beta_{rl} = \frac{1 + \alpha_r^2}{1 - \alpha_r^2} = \frac{1 + 0.871^2}{1 - 0.871^2} = 7.297$$

#### 1.4.3 护环与端环的变形系数

由本身离心力引起护环内圆处的变形系数(即  $n=1\ 000$  r/min 时,内圆直径的增大):

$$K_p = 1.91 \times 10^{-11} D_{po}^3 \alpha_p (4.5 + \alpha_p^2) = 1.91 \times 10^{-11} \times 1\ 104^3 \times 0.845 (4.5 + 0.845^2) = 0.113\ 2 \quad (4)$$

由本身离心力引起端环外圆处的变形系数(即  $n=1\ 000$  r/min 时,外圆直径的增大):

$$K_r = 3.64 \times 10^{-11} D_{ro}^3 (1 + 4.5 \alpha_r^2) = 3.64 \times 10^{-11} \times 933^3 (1 + 4.5 \times 0.871^2) = 0.130 \quad (5)$$

(1) 在转速  $n=1\ 100$  r/min 时,直径的变化。

由护环本身离心力引起护环内径的增大:

$$D_p = K_p \left( \frac{n}{1\ 000} \right)^2 = 0.113\ 2 \left( \frac{1\ 100}{1\ 000} \right)^2 = 0.137 \text{ mm} \quad (6)$$

由端环本身离心力引起端环外径的增大:

$$D_r = K_r \left( \frac{n}{1\ 000} \right)^2 = 0.130 \left( \frac{1\ 100}{1\ 000} \right)^2 = 0.157\ 3 \text{ mm} \quad (7)$$

由铜排伸出槽部分的离心力作用于端环的总幅向力:

$$Q_r = 2.75 \times 10^{-6} G_b D_{ro} n^2 = 2.75 \times 10^{-6} \times$$

$$0.42 \times 933 \times 1\ 100^2 = 1\ 304 \text{ N} \quad (8)$$

式中:  $G_b$ ——铜排伸出槽单边质量,  $G_b=0.42$  kg。

铜排伸出槽部分的离心力作用于端环引起端环外径的增大:

$$D_b = Q_r \lambda_r = 1\ 304 \times 0.327 \times 10^{-6} = 4.26 \times 10^{-6} \text{ mm} \quad (9)$$

由于端环发热引起端环外径的增大:

$$D_t = D_{ro} 1.67 \times 10^{-3} = 933 \times 1.67 \times 10^{-3} = 1.558 \text{ mm} \quad (10)$$

(2) 在转速  $n=1\ 100$  r/min 时,护环的应力如下。

护环内圆承受总的外加径向压力:

$$P_p = \frac{D_b + D_r + D_t - D_p}{\lambda_p + \lambda_r} = \frac{4.26 \times 10^{-6} + 0.157\ 3 + 1.558 - 0.137}{0.16 \times 10^{-6} + 0.327 \times 10^{-6}} = 3.2 \times 10^6 \text{ N} \quad (11)$$

由于外加任何径向压力引起护环内的切向拉应力:

$$\sigma_{pl} = \frac{0.159 P_p}{F_p} = \frac{0.159 \times 3.2 \times 10^6}{1\ 795} = 283.5 \text{ MPa} \quad (12)$$

式中:  $F_p$ ——护环截面积,  $F_p=1\ 795 \text{ mm}^2$ 。

由护环本身离心力引起护环内圆处的切向拉应力:

$$\sigma_{p2} = \frac{2.06 \times 10^5 D_p}{D_{pi}} = \frac{2.06 \times 10^5 \times 0.137}{933} = 31.0 \text{ MPa} \quad (13)$$

那么,当转速  $n=1\ 100$  r/min 时,护环在内圆处的总切向应力:

$$\sigma_p = \sigma_{pl} + \sigma_{p2} = 283.5 + 31.0 = 314.5 \text{ MPa} \quad (14)$$

许用应力:

$$[\delta] = 0.4 \delta_s = 0.4 \times 835 = 334 \text{ MPa}$$

式中:  $\delta_s$ ——材料的屈服极限,  $\delta_s=835 \text{ MPa}$ 。

经计算,加护环后满足要求。

#### 1.5 轴承策略

为确保电机在 990 r/min 运行时,由于制造、安装误差以及飞轮支点、质量的影响。采用了具有自调平的推力轴承,同时在标准轴承基础上加大了推力及上、下导轴承结构尺寸,提高各轴承承

载能力,以确保电机运行稳定性。

轴承特点:有效承载面积大(采用圆形瓦面,消除边缘效应);抗冲击、吸振性能好;均载性好,不会出现单瓦过载现象;安装、调试、维修方便,不需刮瓦;互换性、通用性好;运行可靠性高,使用寿命长;有效解决高速电机轴承漏油问题。

该结构的轴承允许的倾摆角较大,其许用的倾摆角计算公式为

$$X(\text{弧度}) = \frac{2(F_{B_{\max}} - F_B)}{C_{\text{ges}} \cdot d_m} \tag{15}$$

式中:  $F_{B_{\max}}$ ——轴承最大承受载荷;  
 $F_B$ ——轴承实际工作载荷;  
 $C_{\text{ges}}$ ——碟形弹簧刚度系数,  $C_{\text{ges}} = C_{\text{RD}} \cdot Z$ ;  
 $C_{\text{RD}}$ ——单个碟形弹簧刚度系数;  
 $Z$ ——推力瓦块数。

推力弹性瓦滑动轴承计算结果如表 2 所示。滑动轴承结构如图 3 所示。

| 表 2 推力弹性瓦滑动轴承计算结果                              |         |
|------------------------------------------------|---------|
| 参数名称                                           | 参数值     |
| 圆瓦直径/mm                                        | 225     |
| 轴承平均直径/mm                                      | 675     |
| 瓦块数                                            | 9       |
| 工作载荷/N                                         | 220 000 |
| 转速/(r · min <sup>-1</sup> )                    | 990     |
| 润滑油牌号                                          | 46      |
| 油池温度/℃                                         | 55      |
| 环境温度/℃                                         | 40      |
| 推力盘直径/mm                                       | 905     |
| 推力盘厚度/mm                                       | 76      |
| 导瓦功耗/kW                                        | 8       |
| 散热面积/m <sup>2</sup>                            | 3       |
| 散热系数/(kW · m <sup>-2</sup> · k <sup>-1</sup> ) | 0.01    |
| 轴承平均比压/MPa                                     | 2.18    |
| 最小油膜厚度/mm                                      | 0.025   |
| 油量/(L · min <sup>-1</sup> )                    | 15.6    |
| 轴承功耗/kW                                        | 14.4    |
| 搅动损失/kW                                        | 2.8     |
| 总功率损耗/kW                                       | 20      |
| 自然散热功率/kW                                      | 0.45    |
| 冷油器功率/kW                                       | 21      |
| 平均油温/℃                                         | 57.8    |
| 最高温度/℃                                         | 70      |
| 平均温升/K                                         | 20.7    |

1.6 机座策略

电机不承受外加轴向力,只承受电机转子和飞轮重量共 22 t,机座采用常规结构设计,刚强度满足使用要求。

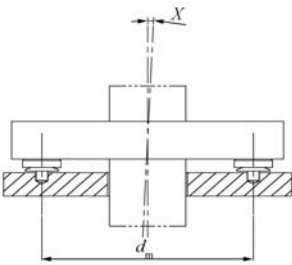


图 3 弹性支承轴承推力滑动轴承

2 电机试验结果

电动机 2017 年 12 月试制完毕,通过试验,电动机的各项指标符合使用的要求。电机转动惯量达到要求,如表 3 所示。结构设计满足加装的飞轮后电机运行稳定可靠。

| 表 3 试验数据                       |                    |                     |      |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|------|
| 参数名称                           | 设计值                | 试验值                 | 保证值  |
| 额定功率/kW                        | 5 600              | 5 600               |      |
| 额定电压/kV                        | 10                 | 10                  |      |
| 定子绕组电阻/Ω                       | 0.067 77<br>(75 ℃) | 0.070 968<br>(75 ℃) |      |
| 定子绕组温升/K                       |                    | 66.7                | 80   |
| 上轴承温度/℃                        |                    | 65                  | 80   |
| 下轴承温度/℃                        |                    | 68                  | 80   |
| 效率/%                           | 97.37              | 96.62               | 95.5 |
| 堵转电流/倍                         | 5.59               | 5.48                | 6.5  |
| 堵转转矩/倍                         | 1.12               | 1.06                | 0.8  |
| 最大转矩/倍                         | 2.28               | 2.38                | 1.8  |
| 振动位移/μm                        |                    | 29                  | 37   |
| 振动加速度/(m · s <sup>-2</sup> )   |                    | 2.5                 | 3.6  |
| 振动速度/(mm · s <sup>-1</sup> )   |                    | 2.3                 | 2.8  |
| 噪声/dB                          |                    | 103                 | 107  |
| 带飞轮转动惯量/(kg · m <sup>2</sup> ) | 6 500              | 7 114               |      |

3 结 语

大容量、高转速立式电机加装大转动惯量飞轮,运行的稳定可靠非常重要。根据设计计算、设计及试验验证,电机满足运行要求。该电机的研制成功,为类似结构电机的设计、制造积累了经验。

【参 考 文 献】

[ 1 ] 汤蕴珍,史乃.电机学[M].北京:机械工业出版社,2011.  
[ 2 ] 陈世坤.电机设计[M].北京:机械工业出版社,2000.  
[ 3 ] 钱伟长.电机设计强度计算的理论基础[M].合肥:安徽科学技术出版社,1992.

收稿日期: 2017 -12 -20