

# 地铁区间射流风机起动方式的经济效益分析

靳 凯

(上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海//工程师)

**摘 要** 结合地铁区间射流风机供配电的实际情况,依据相关规范对风机起动时母线电压降、电动机端子电压降、起动转矩等方面的要求,对射流风机在全压起动、软起动2种不同起动方式下的载流量、电压降等指标进行计算,并对2种起动方式的技术经济进行对比分析,进而得到30 kW、45 kW、55 kW等常用规格区间射流风机在不同供电距离下适宜采用的起动方案。

**关键词** 地铁;射流风机;全压起动;软起动

**中图分类号** U453.5

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.03.039

## Economic Benefit Analysis of Jet Fan Starting Mode in Metro Interval

JIN Kai

**Abstract** Considering the actual power supply situation of jet fans in metro interval and the technical specifications related to fan starting, such as bus voltage drop, motor terminal voltage drop, starting torque, the calculation of current carrying capacity and cable voltage drop of jet fan under 2 different starting modes of direct starting or soft starting is conducted. The two starting modes are compared and analyzed technically and economically. The starting scheme suitable for jet fan of regular power capacity (30 kW, 45 kW, 55 kW etc.) at different power supply distances is concluded.

**Key words** metro; jet fan; direct start; soft start

**Author's address** Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 200235, Shanghai, China

地铁区间射流风机主要用于运营前通风换气、区间阻塞或火灾工况排烟。因隧道洞口气流组织困难,射流风机(如图1中FJ1-FJ8)多设置在出入段线隧道洞口或车站岔线区,距离车站变电所较远。

根据风机容量和配电距离的不同,区间射流风机一般有全压起动和软起动2种配电方案。其中:

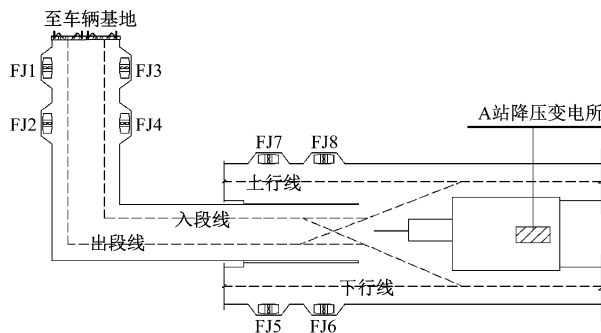


图1 射流风机平面布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of jet fan plan layout

全压起动的优点是设备简单、操作维护方便,缺点是起动电流较大,需要通过增大电缆截面来减少对配电系统电压的冲击;软起动由于增加了软起动控制柜,其起动电流较小,对配电系统影响也较小,缺点则是设备相对复杂、投资较高。

## 1 相关规范要求

对于风机的起动问题,GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》、GB 50052—2009《供配电系统设计规范》等规范对风机起动时母线电压降、电动机端子电压降、起动转矩等方面作了如下明确要求:①电动机不频繁起动(起动次数 $<10$ 次/h)时,配电母线上的电压不宜低于额定电压的85%<sup>[1]</sup>;②电动机起动时,其端子电压应能保证机械要求的起动转矩,且在配电系统中引起的电压波动不应妨碍其他用电设备的工作<sup>[1]</sup>;③电动机类用电设备端子处电压偏差允许值宜符合 $\pm 5\%$ 额定电压的要求<sup>[2]</sup>;④对于低压电动机,应保证接触器线圈的电压不低于释放电压<sup>[1]</sup>,单独使用或装在起动器中使用的电磁式接触器,在其额定控制电源电压 $U_n$ 的85%~110%之间取任何值时均应可靠闭合<sup>[3]</sup>。

2 计算公式

根据《工业与民用供配电设计手册(第四版)》<sup>[4]</sup>(以下简称“配电手册”),相关计算公式如下。

2.1 电缆载流量

$$I_z \geq I/K \tag{1}$$

式中:  
 $I_z$ ——电缆载流量;  
 $I$ ——负荷计算电流;  
 $K$ ——载流量校正系数。

2.2 三相平衡负荷线路的电压损失

$$\Delta u = \Delta u_a l \tag{2}$$

式中:  
 $\Delta u$ ——线路电压损失百分数,%;  
 $\Delta u_a$ ——三相线路每1 A·km 的电压损失百分数,%/(A·km);  
 $l$ ——线路长度,km。

2.3 鼠笼式电动机起动时的母线电压相对值

$$U_{stB} = 1.05 S_{scB} / (S_{scB} + Q_L + S_{st}) \tag{3}$$

$$S_{scB} = S_{rT} / (x_T + S_{rT} / S_k) \tag{4}$$

$$Q_L = 0.6 (S_{rT} - 0.75 S_{rM}) \tag{5}$$

$$S_{st} = 1 / (1 / S_{stM} + X_1 / U_{av}^2) \tag{6}$$

式中:  
 $U_{stB}$ ——电动机起动时母线电压相对值;  
 $S_{scB}$ ——母线短路容量,MVA;  
 $Q_L$ ——预接负荷的无功功率,Mvar;  
 $S_{st}$ ——电动机起动时起动回路的计算容量,MVA;  
 $S_{rT}$ ——变压器额定容量,MVA;  
 $x_T$ ——变压器短路阻抗, $\Omega$ ;  
 $S_k$ ——变压器一次侧短路容量,MVA;  
 $S_{rM}$ ——电动机额定容量,MVA;  
 $S_{stM}$ ——电动机额定起动容量,MVA;  
 $U_{av}$ ——系统平均电压,kV;  
 $X_1$ ——线路阻抗, $\Omega$ 。

设  $S$  为铜芯电缆截面,当  $S > 150 \text{ mm}^2$  时,  $X_1 = (0.08 + 6.1/S)l$ ; 当  $S \leq 150 \text{ mm}^2$  时,  $X_1 = 18.3/S$ 。

2.4 电动机端子电压要求

鼠笼式电动机起动时,电动机端子电压相对值  $U_{stM}$  为:

$$U_{stM} = U_{stB} S_{st} / S_{stM} \tag{7}$$

电动机起动时,为保证传动机械要求的起动转矩,  $U_{stM}$  应满足:

$$U_{stM} \geq \sqrt{1.1 m_s / m_{st,M}} \tag{8}$$

式中:  
 $m_s$ ——电动机传动机械的静阻转矩相对值;  
 $m_{stM}$ ——电动机起动转矩相对值,即起动转矩与额定转矩的比值。

3 供电系统主要参数

3.1 系统参数

本文以某轨道交通工程为例进行研究。该工程供电系统采用 110 kV/35 kV 二级电压供电方式,其中,35 kV 侧短路容量  $S_k$  为 250 MVA。车站配电变压器选用环氧树脂绝缘干式变压器 SCB10-1250 kVA-35/0.4 kV,其额定容量  $S_{rT}$  为 1.25 MVA,变压器阻抗电压  $u_k$  为 6%,母线短路容量  $S_{scB}$  为 19.23 MVA。

3.2 电缆参数

依据配电手册第 838 页的表 9.3-24、第 875 页的表 9.4-19,得到电缆参数如表 1 所示。

表 1 交联聚乙烯绝缘电力电缆参数  
Tab.1 Parameters of cross-linked polyethylene insulated power cable

电缆规格	载流量/ A	电压降/ (%/ (A·km))	单价/ (元/m)
WDZBN-YJY23-3×70+2×35	246	0.134	293.37
WDZBN-YJY23-3×95+2×50	298	0.105	382.42
WDZBN-YJY23-3×120+2×70	346	0.087	480.32
WDZBN-YJY23-3×150+2×70	399	0.074	563.38
WDZBN-YJY23-3×185+2×95	456	0.064	711.53
WDZBN-YJY23-3×240+2×120	538	0.054	902.43
WDZBN-YJY23-3×300+2×150	621	0.044	1 107.66

注:单价为含安装费的询价。

3.3 射流风机参数

地铁区间射流风机的电动机转速一般为 1 450 r/min,常用功率为 30 kW、45 kW、55 kW,额定电压 380 V,频率 50 Hz。选用某厂家 YE3-4 系列鼠笼型射流风机,其参数如表 2 所示。

3.4 其他参数

- 1) 软起动器:选用某厂家 PSS 系列软起动器,起动变流倍数为 4,起动时间为 10 s。
- 2) 软起动柜:约为 6 万元/台(询价)。

表 2 某厂家鼠笼型射流风机参数

Tab.2 Squirrel cage type jet fan parameters from certain manufacturer

风机型号	功率/ kW	转速/ (r/min)	电压/ kV	效率/ %	额定电流/ A	功率因数	起动电流 倍数	起动转矩 相对值	静阻转矩 相对值
YE3-200L-4	30	1 470	0.38	93.6	57	0.86	7.2	2.2	0.3
YE3-225M-4	45	1 480	0.38	94.2	84	0.86	7.4	2.2	0.3
YE3-250M-4	55	1 480	0.38	94.6	103	0.86	7.4	2.2	0.3

3) 全压起动控制箱:约为0.5万元/只(询价)。

### 4 全压起动和软起动 2 种起动方式下的计算

以 2 台 45 kW 射流风机为例进行计算,根据表 2,选择 YE3-225M-4 型号的射流风机。采用全压起动时,如图 2 a) 所示,双电源切换箱 AT1 两路电源分别引自 A 站降压变电所 I、II 段母线,双电源切换后馈线分别引至射流风机 FJ1、FJ2 的全压起动控制箱,控制箱再引至射流风机接线端子处;采用软起动时,如图 2 b) 所示,取消了全压起动的控制箱 1、控制箱 2,新增软起动柜 1、软起动柜 2。

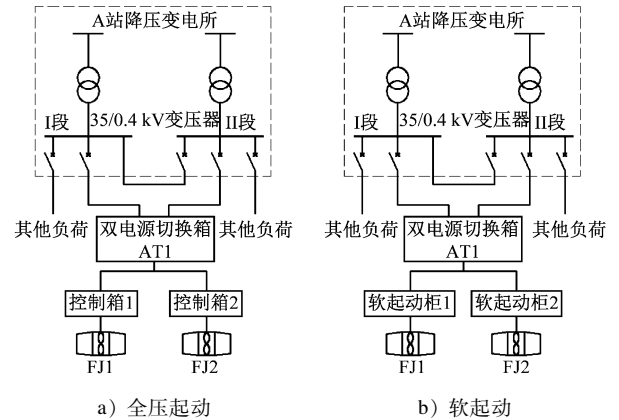


图 2 2 种起动方式下射流风机配电方案对比

Fig.2 Comparison of jet fan power distribution schemes under 2 types of starting modes

本文仅做近似估算,由于 AT1 和控制箱/柜、控制箱/柜和射流风机之间的距离都很小,因此忽略 AT1 至控制箱/柜、控制箱/柜至射流风机的电缆阻抗值,同时忽略变压器到变电所低压开关柜的铜母线阻抗值,仅计入低压开关柜至 AT1 的线路阻抗值。

#### 4.1 采用全压起动方式

最大运行工况为 2 台射流风机同时运行,AT1 的功率  $P$  为 90 kW,电流  $I$  为 168 A,额定容量  $S_{stM}$  为 0.111 MVA;最大起动工况为 1 台射流风机正在运

行时另 1 台射流风机起动,此时起动电流  $I_q$  为 705.6 A,额定起动容量  $S_{stM}$  为 0.464 MVA。比对上文的规范要求,计算及校验步骤如下:

1) 步骤 1,根据载流量选择电缆。AT1 的 2 路进线电缆沿区间电缆支架敷设,取  $K$  为 0.78<sup>[4]</sup>,根据式(1)可得到  $I_z \geq 215.38$  A;根据表 1,选择交联聚乙烯绝缘电力电缆规格为 WDZBN-YJY23-3 × 70 + 2 × 35。

2) 步骤 2,通过最大运行工况下电动机端子电压降确定最远供电距离  $L_m$ 。根据式(2)及要求③,当电缆选用 WDZBN-YJY23-3 × 70 + 2 × 35 且  $\Delta u \leq 5\%$  时, $L_m$  可达到 235 m。

3) 步骤 3,最大起动工况下的母线电压降校验。当电缆选用 WDZBN-YJY23-3 × 70 + 2 × 35、供电距离为 235 m 时, $X_1$  为 0.06  $\Omega$ ,根据式(3)可得  $U_{stB}$  为 99.36%,满足要求①。

4) 步骤 4,最大起动工况下的电动机端子电压降校验。根据式(7)可得  $U_{stM}$  为 82.92%。根据式(8),为保证起动转矩要求,则  $U_{stM} > 38.73\%$ ,满足要求②,但由于  $U_{stM} < 85\%$ ,不满足要求④中接触器线圈释放电压的要求。如需满足  $U_{stM} \geq 85\%$ ,则反算出  $L_m$  为 199 m。

重复步骤 3 和步骤 4,当  $L_m$  为 199 m 时, $U_{stB}$  为 99.31%,母线压降校验通过。此时  $U_{stM}$  为 85.02%,大于 38.73%,起动转矩校验通过; $U_{stM}$  在 85% ~ 110% 的范围内,接触器线圈释放电压校验通过。

综上分析,射流风机 FJ1(45 kW)、FJ2(45 kW)按照上述条件采用全压起动时,在 0 ~ 199 m 的供电范围内,选择交联聚乙烯绝缘电力电缆 WDZBN-YJY23-3 × 70 + 2 × 35,可满足载流量、运行时电压降、起动时母线电压降、起动时电动机端子电压降、起动转矩、接触器线圈释放电压等各项要求。

#### 4.2 采用软起动方式

采用软起动方式时,选用某厂家 PSS 系列软起动器,起动电流倍数为 4,其余条件与全压起动方式

相同。此时,最大运行工况同全压起动方式;最大起动工况为1台射流风机运行时另1台射流风机起动,此时起动电流 $I_q$ 为420 A,额定起动容量 $S_{stM}$ 为0.276 MVA。

计算及校验步骤如下:

1) 步骤1,根据载流量选择电缆。同全压起动方式,选择交联聚乙烯绝缘电力电缆WDZBN-YJY23-3×70+2×35。

2) 步骤2,通过最大运行工况下电动机端子电压降确定 $L_m$ 。同全压起动方式, $L_m$ 为235 m。

3) 步骤3,最大起动工况下的母线电压降校验。计算方法同全压起动方式,得到 $U_{stB} \geq 85\%$ ,满足要求①。

4) 步骤4,最大起动工况下的电动机端子电压降校验。计算方法同全压起动方式,得到 $U_{stM}$ 为89.49%,其大于起动转矩要求的电动机端子电压降38.73%,校验通过,满足要求②; $U_{stM}$ 在85%~110%的范围内,满足要求④。

综上所述,在其余条件不变的情况下,当起动方式改为软起动时, $L_m$ 可达235 m。

5 全压起动与软起动的方案比选

5.1 供电距离比较

按照上述计算方法,可得出2台45 kW的射流风机共用1个AT1时进线电缆规格与供电距离的关系,如表3所示。

表3 进线电缆规格与供电距离的关系

进线电缆型号	$L_m/m$		满足规范要求下合理的供电距离范围/m	
	全压起动	软起动	全压起动	软起动
WDZBN-YJY23-3×70+2×35	199	235	0~199	0~235
WDZBN-YJY23-3×95+2×50	270	299	199~270	235~299
WDZBN-YJY23-3×120+2×70	341	361	270~341	299~361
WDZBN-YJY23-3×150+2×70	425	425	341~425	361~425
WDZBN-YJY23-3×185+2×95	461	491	425~461	425~491
WDZBN-YJY23-3×240+2×120	494	582	461~494	491~582
WDZBN-YJY23-3×300+2×150	519	715	494~519	582~715

5.2 费用对比

本文只考虑变电所低压开关柜至区间射流风机之间的费用,其主要由3个部分内容组成:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \tag{9}$$

式中:

- $C$ ——总费用;
- $C_1$ ——设备费用;
- $C_2$ ——电缆费用;
- $C_3$ ——其他费用。

计算时,忽略了 $C_1$ 因容量不同带来的价格差异; $C_2$ 的电缆由低压开关柜至AT1、AT1至控制箱/柜(距离按20 m考虑)、控制箱/柜至射流风机(距离按20 m考虑)等3部分组成;计算 $C_3$ 时,忽略不同起动方式下的差异,近似认为2种起动方式下其他费用相等。

根据表1和表3,则可得到2台45 kW射流风机在不同起动方式下的费用 $C$ 与供电距离 $L$ 的关系,如图3所示。可以看出:

1) 当射流风机与变电所的距离小于461 m时,采用全压起动更为合理。这是因为对于容量确定的风机,供电距离较小时,进线电缆的截面主要取决于正常运行时末端电缆电压降 $\Delta u \leq 5\%$ 的要求,2种起动方式下的电缆截面相差并不大,费用差别主要是因为软起动柜费用较高。

2) 随着供电距离的增大, $U_{st,M}$ 逐渐成为了关键因素,导致全压起动方式下的电缆截面要比软起动方式下的电缆截面大。而且随着供电距离的不断增大,2种起动方式下电缆的费用差也会越来越大,所以当射流风机与变电所的距离大于461 m时,采用软起动方式更为合理。

5.3 不同功率射流风机的起动方案比选

同理分别计算出2台30 kW射流风机、2台55 kW射流风机在不同起动方式下的费用与供电距离的关系,如图4~5所示。可以看出:

1) 对于2台30 kW射流风机,当射流风机与变电所的距离小于786 m时,采用全压起动更为合理;

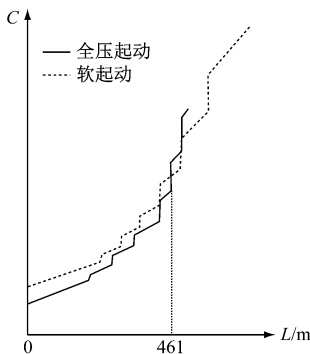


图3 2台45 kW射流风机在不同起动方式下的费用-距离关系

Fig. 3 Cost-distance relationship of two 45 kW jet fans under different starting modes

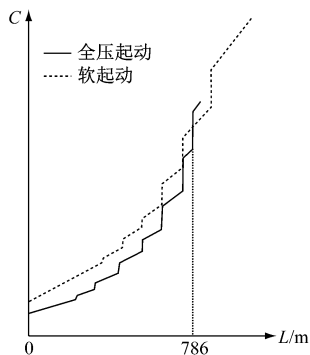


图4 2台30 kW射流风机在不同起动方式下的费用-距离关系

Fig. 4 Cost-distance relationship of two 30 kW jet fans under different starting modes

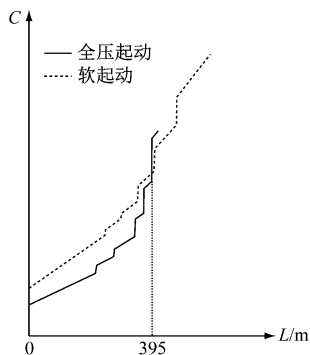


图5 2台55 kW射流风机在不同起动方式下的费用-距离关系

Fig. 5 Cost-distance relationship of two 55 kW jet fans under different starting modes

当射流风机与变电所的距离大于786 m时,采用软起动更为合理;

2) 对于2台55 kW射流风机,当射流风机与车站变电所的距离小于395 m时,采用全压起动合理,当射流风机与变电所的距离大于395 m时,采用软

起动更为合理。

## 6 结语

在区间射流风机的供配电设计中,既不能简单地靠放大电缆截面来满足风机的起动和运行要求,也不能忽略风机容量、风机与变电所的距离等因素一概采用软起动方式,而应在满足技术指标的前提下,结合投资费用进行合理的经济分析比较,这对城市轨道交通工程项目节约投资具有重大意义。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 通用用电设备配电设计规范:GB 50055—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012:3.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design of electric distribution of general-purpose utilization equipment: GB 50055—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012: 3.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 供配电系统设计规范:GB 50052—2009[S]. 北京:中国计划出版社,2010:8.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for design electric power supply systems: GB 50052—2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010: 8.
- [3] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 低压开关设备和控制设备第4-1部分:接触器和电动机起动器机电式接触器和电动机起动器(含电动机保护器):GB 14048.4—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011:25.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Low-voltage switchgear and controlgear—part 4-1: contactors and motor-starters—electromechanical contactors and motor starters (including motor protectors): GB 14048.4—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011:25.
- [4] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用供配电设计手册[M]. 第四版. 北京:中国电力出版社,2016:483.  
China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co., Ltd. Design manual for industrial and civil power supply and distribution [M]. The fourth edition. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 483.

(收稿日期:2020-05-12)