

隧道轴流风机并联应用时的启动安全性分析

刘建明

(豪顿华工程有限公司,北京 100031)

摘要:轴流风机是长大隧道通风系统中的主要设备,风机的安全运行是隧道通风系统安全运营的基本保证。风机节能运行又是系统长期降低运营费用的主要途径。对轴流风机几种启动模式的安全性进行比较,并着重针对具有显著节能效果的控制方式进行分析,并提出建议。

关键词:轴流风机;变频调速;动叶可调;防喘振环

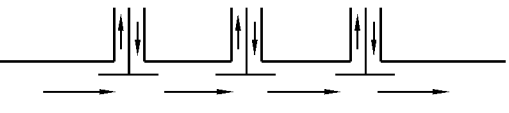
中图分类号:U453.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-0300(2009)03-0073-05

1 引言

随着现阶段高速公路新项目中长大公路隧道的增多,隧道通风系统的设计方案也越来越多,对轴流风机需求量的增加,使得对轴流风机从设计方案的确定,风机布置与选型,以及风机的控制方式选择等都更加引起重视。隧道通风设备是保证隧道交通安全营运的重要组成部分,尤其是在火灾等紧急状态时,良好的通风可以避免造成灾难性的损失。因此,轴流风机是否可以安全可靠地启动和运行就显得格外重要。而由于隧道通风系统的耗电量很大,长期营运的成本昂贵,因此在风机选型和方案设计时,需要合理地安排风机的数量和布置方式,选择高效率风机,采用风机节能的控制模式,尽可能减少通风系统中额外的气动损失等。隧道通风控制系统的稳定性是最重要最基本的要求。因此,必须对不同的通风方案进行充分比选。

2 风机启动及控制方式的分类

按照隧道通风的要求,单向交通的隧道设计风速不宜大于 10 m/s;双向交通的隧道设计风速不应大于 8 m/s^[1];而在隧道发生火灾时,按照逃生者平均奔跑速度为 1.5 m/s 考虑,要求可采取双向排烟通风,风速应控制在 2~3 m/s;对于长大隧道,火灾时还可能采用风速零化措施,以抑制在火灾发生情况下烟雾的扩散速度和范围,使交通空间下半部保持无烟,确保良好的避难环境。因此要合理地选择控制方案,以满足隧道营运尤其是火灾时的通风要求。由于隧道通风所需动力与隧道长度的立方成正比,所以用机械通风时,隧道越长就越不经济。因此,对于长大公路隧道目前多采用竖/斜井送排风加射流风机调压的分段式纵向通风的方式(图1)。通常每个竖/斜井设计两组轴流风机,一组为用于引入新鲜空气的送风机,另一组为用于将污浊空气抽出去的排风机。每组多为2台风机并联,某些情况下有多达四台风机并联。高速公路隧道内的车辆为分洞单向行使,因此轴流风机只需一个方向运行即可。



轴流风机的电机功率都在几百千瓦,设计时必须考虑风机的启动方式。轴流风机的启动方式主要包括:①直接启动;②降压启动;③变频器启动;④动叶可调风机空载启动。

图1 送排式通风系统示意

3 各种控制方式的比较

(1)直接启动,由于轴流风机功率相对较大,直接启动时的启动电流可达电机额定电流的6~7倍,而

收稿日期:2009-05-05

作者简介:刘建明 男 1961年出生 高级工程师

且启动过程中的启动电流维持时间较长,易造成电机过载。采用直接启动的方式必须加大变压器的容量,必要时还需加大电机功率,而且电缆等辅助设备的耗材也相应增加。因此多不采用此种方式。

(2)降压启动方式,这种方式包括星三角启动,自耦变压器启动以及软启动器启动等。这几种方式都可以在启动过程中通过降低电压以达到降低电机启动电流的目的,经过预置时间后,电压达到额定值。因降压启动方式可以减少风机启动时对电网的冲击,减轻变压器的负担及减少对其它用电设备的影响,所以是隧道轴流风机较为普遍的一种应用形式。由于软启动器技术成熟,而且具有平滑起动的限电流功能,启动电流可限制在 1.5~7 倍的额定电流,有较齐全的保护功能,因而在目前隧道风机的控制中较多的被采用。对于隧道内通风控制来说,直接启动与降压启动方式都是取决于风机开停的台数,通风控制属于有级调节。

(3)变频器启动,目前变频器已经是技术相当成熟的产品。变频器功能完善,可以设定风机启动过程时间,限定启动过程的输出电流在额定电流的 1.5 倍以下和限定输出转矩。在启动过程中使风机转速随着频率的变化而变化,而输出电压与输出频率保持一定的规则变化,实现平滑启动^[2]。由于隧道内工况的变化,使得轴流风机经常工作在非额定工作点,而变频器可以在运行过程中随时按照隧道通风要求改变风机转速,以满足通风要求,属无级调节。更为重要的是变频调速具有显著的节能效果。由于风量与转速的一次方成正比,风压与转速的平方成正比,轴功率与转速的立方成正比。当风量减少,风机转速下降时其功率下降很多,例如当所需风量为额定风量的 80%,则转速也下降到额定转速的 80%,而轴功率则下降到额定功率的 51.2%;若所需风量是额定风量的 50%时,轴功率则下降到额定功率的 12.5%^[3]。因此,采用变频调速控制方式来调节风量的方法使轴功率大大降低,节能效果显著,还可避免频繁启停风机。

(4)动叶可调轴流风机空载启动,这种风机的转子叶片角度可以在风机运行过程中从 0% 到最大角度 100% 之间连续调节。在风机启动过程中,可先将叶片角度设定为 0%,使风机叶片在不对气体做功的状态下,即空载状态下启动电机。风机启动后始终是在固定转速下运行,但风机转子的叶片角度将根据通风系统的要求可随时且连续的调整,通风属于无级调节。这种定速动叶可调风机相对于定速固定叶片角度的风机,在非额定工作点运行时的轴功率降低很多,节能效果依然显著,也避免了频繁启停风机。

4 风机在不稳定工作区运行

轴流风机性能曲线包括“稳定区”和“不稳定区”。图 2 是个典型的轴流风机空气动力性能曲线。当系统阻力增加时,流量相应的减少,风机最初运行在 1~2 之间的稳定状态。如果流量进一步减少且低于点 2 时,气流相对叶片的入口角度低于一定的值时,气体开始从叶片表面分离,局部流道面积堵塞,甚至局部出现倒流,气流不稳定,风机进入失速状态。轴流风机在点 3 回到一个“半稳定”的第 2 条特性曲线上,从这里开始流量可以进一步减少而阻力又开始增加。如果系统阻力降低使风机的工作点从点 4 移动回到点 5,随着进一步降低系统阻力,工作点再从该点跳回到稳定工况点 6。由 2,3,5 和 6 点组成的区域叫做“滞后区”,这是风机运行的极其不稳定区域,气体具有不确定的流动性。在不稳定区域,风机将发生喘振,喘振发生时由于气流强烈的脉动和周期性振荡,噪声加剧,对风机危害相当严重。应避免轴流风机在此区域内运行。

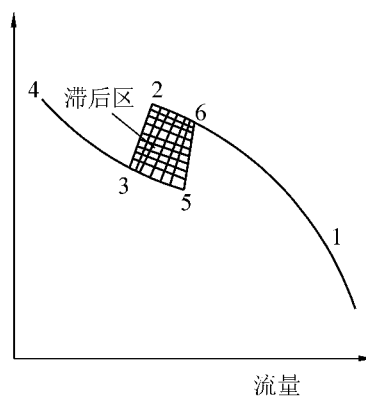


图 2 典型轴流风机性能曲线

目前在部分隧道通风系统上,为防止轴流风机启动时出现喘振,在风机的机壳上加设防喘振环。当风机工作在喘振区时,使气流进入防喘振环,避免风机的喘振^[4]。它可以使风机的稳定工况范围扩大。但其显著缺点是即使风机不进入失速区,由于防喘振环的存在,部分气流做了无用功,使风机效率因此而降低大约 3%,同时还增加了风机结构的复杂性,也增加了风机的成本。因此在风机选型及控制方案设计时,就必须考虑到风机的喘振问题。如采用两台风机并联时,选择

风机的工作点应远离风机喘振区,避免发生喘振现象。而如果风机不会进入喘振区,就不必设置防喘振环装置,这将使风机结构变得简单,既可以提高风机效率,又可以降低成本。

5 风机并联布置对风机启动过程的影响

隧道通风系统的轴流风机多为并联应用。多数隧道通风系统是采用两台风机并联,考虑到风机房和风道的尺寸,从气动性能讲,三台甚或四台风机并联运行时,都会对气体流动性产生不利的影响,从而影响系统运行效率和启动的稳定性。在多台风机并联工作时,如果不仔细地研究风机的启动过程,将可能使最后启动的那台风机工作在喘振状态。下面对三种不同控制方式的风机加以分析。

5.1 固定叶片角度的定速风机

这种形式的风机,其自身的通风量是不可调节的。因此在对这种风机进行选型时,应使风机工作点位于性能曲线较低的位置,尽量远离喘振区,这样可使第一台风机满负荷运行后开启第二台风机时,不会进入喘振区。如果是三台风机并联,也可以通过风机选型而避免第三台风机进入喘振区。如果必须在风机上设置防喘振环,就要付出降低风机效率的代价,这将使长期运营成本增加许多。

5.2 固定叶片角度的变频调速风机

这种控制方式的风机性能曲线,随着转速的变化而变化,但每条性能曲线形状相似(图3)。每条阻力曲线都具有相同的风机效率,因此风机在非设计工况点下也能够提供同样高的风机效率。变频调速风机的叶片角度是固定不变的,其失速线基本是依据阻力与流量呈二次方的关系特性,与系统阻力线形状相类似。假设隧道风机在启动时要承受 100 Pa 的竖井提升阻力,风机额定转速为 750 r/min,入口设有隔离挡板,在低速范围内风机是运行在失速线的左侧,说明在此期间风机是在“失速”状态下工作。这将影响到并联风机的启动过程。图3中包括了单台风机运行从启动到额定转速阻力曲线 L_1 和最多四台并联时的第四台风机阻力曲线 L_4 。第一台风机启动时,风机吸入口隔离挡板处于关闭状态,风机是从零流量开始启动,风机启动过程中必须克服 100 Pa 的风井提升压力。随着挡板开启的同时逐渐加速风机,在低速初始阶段风机运行于特性曲线的“不稳定”区域。隔离挡板全部打开后,使空气加速流过风机进入隧道。在大约 320 r/min 时,风机曲线将与失速线相交并切换到失速线右侧的稳定区域。从这点开始,转速可以进一步增加直至所需的额定负荷,风机都会在稳定的状态下运行。在第一台风机正常运行后启动第二台风机时,要克服由第一台风机运行所产生的压升。然而相对来说这个阻力是较小的,因而第二台风机的系统阻力线是靠近第一台风机阻力线的,启动过程也是与第一台风机相类似,这说明多数情况下第二台风机可以不受约束地安全启动并投入正常运行。然而更多的风机并联,情况会更加严重。图3中 L_4 表示在前三台风机全速运行后启动第四台风机的阻力曲线。理论上第四台风机转速要升至将近 500 r/min 才能从不稳定状态进入到稳定状态。然而,在其它风机已经运行的情况下,该台轴流风机在不稳定的区域内运行,使得气体的波动很大。实际上,按照这种布置方式,第4台风机不能按照理论上的系统阻力线 L_4 运行,而是在过渡区域运行。这意味着第4台风机可能不会达到稳定状态,而始终运行在不稳定的过渡区域,处于失速状态。轴流风机在不稳定区域运行将使叶片产生振动,材料所受到的应力会超过限定值,因而不允许风机在这种状况下长时间运行。风机上可设置失速传感器,在不稳定状况下失速传感器检测到失速并超过一定时间后仍未进入稳定状态时,通常要求停止风机运行以避免造成叶片的损坏。

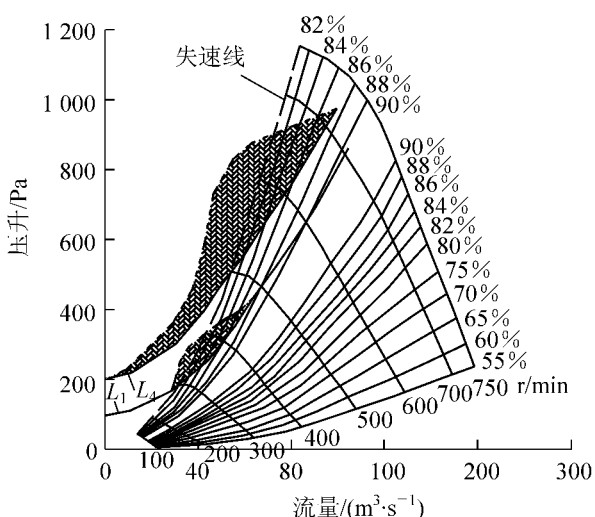


图3 变频调速风机性能曲线

5.3 定转速动叶可调风机

定转速动叶可调风机具有更高的灵活度,对于这种较为复杂的多台风机并联的布置方式,可以采用动叶可调风机替代变频调速风机,以满足系统的稳定性要求。图 4 是转速为 750 r/min,并与前面所述风机具有相同尺寸的动叶可调风机性能曲线,图 4 中也包括了单台风机运行从启动到额定叶片角度的阻力曲线 L_1 和最多四台并联时的风机阻力曲线 L_4 。动叶可调风机的显著优势在于相比于变速轴流风机的性能曲线,其失速线上移且更趋于平缓,不再像变速轴流风机那样有类似阻力与流量呈平方关系的失速线。风机叶片在小角度范围内不再存在不稳定区域,从额定到 0 流量,风机都可以稳定运行。并且也允许在已有三台并联风机运行的情况下启动第四台并联风机。动叶可调风机的特性允许风机工作在启动过程中的瞬态过程,只要风机的最大压升不超过性能曲线上的“马鞍线”。在竖斜井共用井口时,动叶可调轴流风机允许四台并联风机在不同的流量下工作,因而应用起来具有很高的灵活性,特别是一旦发生火灾等紧急情况时,隧道中的某些区域可能需要更多的新鲜空气,而其它区域需求量较低。要满足这种需求,就要求风机必须安全稳定的工作,而且能够在产生同样压升的同时提供不同的流量。很明显,变速调节的轴流风机不能满足这种要求。

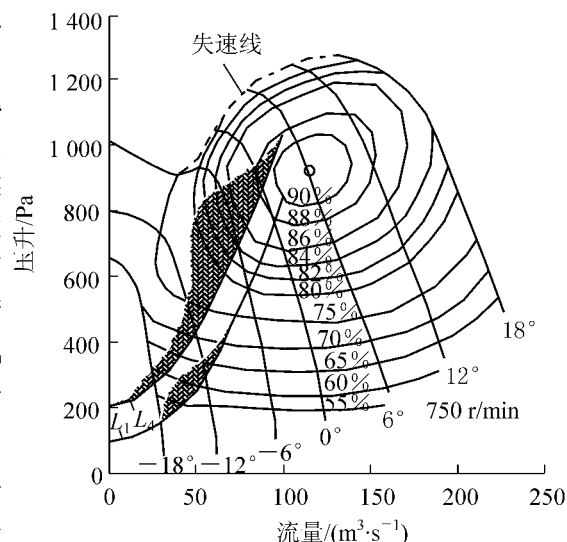


图 4 动叶可调风机性能曲线

6 几种控制方式的组合

(1) 送风机采用动叶可调风机,排风机采用变频调速风机。通常在竖井风道中具有一定提升压力的情况下,并联布置的动叶可调轴流风机也可以安全启动,并且在小流量的情况下,风机可以输出相对较高的压力,因而动叶可调风机适合于隧道的送风机。而变频调速风机更适合应用于排烟风机,以便准确地控制隧道内的风速。尤其是在火灾发生等紧急状态时,竖井将对排烟起到好的效果。此时竖井具有烟囱的作用,使风机紧急启动时,提升压力对风机启动起到助力作用,便于风机安全启动。由于风量与转速呈线性关系,因此变频调速风机可以在火灾时精确的控制隧道风速。

(2) 送风机与排风机都采用动叶可调轴流风机。送风机与排风机可以同时采用动叶可调轴流风机,适于多台风机并联使用。启动稳定性好,节能效果显著。

(3) 送风机为不可调风机,排风机为可调节风机。送风机采用固定叶片角度的定转速风机,通过改变开停风机台数以调整通风量,排风机采用变频调速或动叶可调风机。这种方式也可以做到无级调节,但隧道通风控制的灵活性较差,在送风机每一次开停的过程中,都会对隧道内的风速产生较大的扰动。

(4) 送排风机都采用固定叶片的定转速轴流风机。这是国内现有隧道通风系统中使用较多的形式。这种风机的通风控制简单,仅靠风机的开停台数控制隧道的通风,隧道通风量是有级调节,不利于隧道通风系统的节能运行。风速控制精度低,尤其是在火灾等紧急状态下,风速难以精确控制。

7 结语

从并联轴流风机运行效率和启动的安全性考虑,两台风机并联使用效果较好。风机启动和控制方式都较为灵活,可以采用动叶可调,变频调速,或普通非调节型的轴流风机,而又不是必须要设置防喘振环。动叶可调与变频调速轴流风机都具有较好的节能效果,而动叶可调轴流风机更具有启动灵活性和运行可靠性。在一些隧道设计时,考虑到远期隧道运营通风需求与近期需求差别较大,需要增加并联风机的台数。因此如果需要同时三台或四台轴流风机并联运行时,采用动叶可调轴流风机无疑是既安全可靠又节

能的较好方案。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部. JTGD26. 1—1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 张燕宾. SPWM 变频调速应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 赵忠杰. 公路隧道机电工程[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [4] 昌泽舟. 轴流式通风机实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

Safety Analysis for Start-up of Tunnel Axial Fans in Parallel Connection

Liu Jianming

(Howden Hua Engineering Co., Ltd, Beijing 100031)

Abstract: Axial fans are the main equipment in the long tunnel ventilation system. The safe running of the fans is the basic guarantee for tunnel safety operation. Energy-saving operation of fans is the main method for reducing long-term operation cost. In this paper, several start-up manners are compared for safety, and the control method that is significantly energy-saving is emphatically analyzed.

Key words: axial fan; VVVF control; blade angle adjustable; anti-stall ring

~~~~~  
(上接第 72 页)

## 4 结语

渔泉溪大桥经过以上的施工监控,最后全桥合龙误差最大为 7 mm、最小为 3 mm,达到了施工精度要求。本桥线形及应力监控良好,从而也说明了 Kalman 滤波法在连续刚构桥施工控制应用中的可行性和实用性。

## 参 考 文 献

- [1] 姚波,郑青青. 大跨径预应力连续梁桥悬臂浇筑施工监控[J]. 山西建筑,2007,33(2):269-270.
- [2] 曹江海. 145 m 高墩连续刚构施工控制与监测[J]. 铁道建筑技术,2005(6):23-26.
- [3] 张永水. 大跨度预应力连续刚构桥施工误差调整的 Kalman 滤波法[J]. 重庆交通学院学报,2000,19(3):13-15.

## Construction Simulation and Control Analysis of a Large-span Continuous Rigid Frame Bridge

Zhang Xiucheng

(Department of Civil and Architecture Engineering of Putian University, Putian 351100, China)

**Abstract:** In this paper, the background is set in the construction control of Yuquanxi Bridge in Yichang-Enshi Segment of Shanghai-Chengdu-Xizang Expressway. The following procedures are taken: the simulation analysis of the bridge construction, simulation of the construction process, adjusting of the error analysis of the construction of the bridge using the error theory of Kalman filter method. Through on-site elevation measurement and control of the section stress, bridge linear structure and the load condition is analyzed and guidance provided to the construction.

**Key words:** construction simulation; Kalman filter; construction control; error analysis