

# 基于远程变频的公路隧道按需通风技术研究

黄文掇

深中通道管理中心

DOI:10.12238/jpm.v3i11.5423

**[摘要]** 变频技术凭借其可实现无级调速,降低能耗的能力,已被广泛应用于工业、民用领域。公路隧道通风系统通常按最不利环境配置风机数量,同时还考虑一定的备用风机,而事实上多数运营情况下,隧道内不需要开启所有风机。根据流体力学及电机学原理,通风系统电能消耗与通风量成3次方的关系。也即是说,利用变频技术控制通风系统送风量远比利用开启台数控制送风量消耗更少的电能。变频技术突出的节能效果说明其在公路隧道通风系统内有较好的应用价值。但常规的变频器无法适应隧道内较为恶劣的运营环境,而将变频器置于洞外远程驱动风机又存在较大困难。本文针对这一问题开展专项研究,研究变频远程驱动射流风机的适应性;同时还开展智能控制算法研究,实现洞内风速智能控制,从而达到隧道内按需通风的目的。

**[关键词]** 高速公路;隧道通风;节能技术;控制研究。

## The research on on-demand ventilation technology of highway tunnel based on remote frequency conversion

**[Abstract]** Frequency conversion technology has been widely used in industrial and civil fields with its ability to realize stepless speed regulation and reduce energy consumption. The ventilation system of highway tunnel usually configures the number of fans according to the most unfavorable environment, and also considers a certain amount of standby fans. In fact, in most operating cases, it is not necessary to start all fans in the tunnel. According to the principles of hydrodynamics and electrical machinery, the relationship between electric energy consumption of ventilation system and ventilation volume is cubic. That is to say, using frequency conversion technology to control the air supply volume of the ventilation system consumes far less power than using the number of open units to control the air supply volume. The outstanding energy-saving effect of frequency conversion technology shows that it has good application value in highway tunnel ventilation system. However, the conventional frequency converter cannot adapt to the harsh operating environment in the tunnel, and it is difficult to place the frequency converter outside the tunnel to remotely drive the fan. In this paper, a special study is carried out to study the adaptability of remote driving jet fan with frequency conversion; At the same time, intelligent control algorithm research is also carried out to realize the intelligent control of wind speed in the tunnel, so as to achieve the purpose of ventilation on demand in the tunnel.

**[Key words]** Expressway; Tunnel ventilation; Energy saving technology; Control study.

### 引言:

随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的迅速发展,20世纪60~70年代采用电力电子变流器的交流传动系统得以实现,特别是大规模集成电路和计算机控制的出现,使得高性能交流调速系统应运而生,形成一种交流调速取代直流调速的发展趋势。电机交流变频调速技术是当今节能减排、改善工艺流程以提高产品质量和改善不断恶化环境、推动技术进步的一种主要手段。变频调速凭借其优异的调速和起动、制动性能,高效率、高功率因数和节能效果,广泛的适用范围及其它许多

优点而被国内外公认为最有发展前途的调速方式。

### 一、公路隧道通风控制的基本方法

根据《公路隧道通风设计细则》(JTJ/T D70/2-02-2014)和《公路隧道设计规范第二册交通工程与附属设施》(JTG/T D70/2-2014),目前我国公路隧道普遍采用的公路隧道通风控制方法是:通过分布在隧道内各点的VI检测器和CO检测器,直接检测行驶车辆排放出的烟雾浓度和CO浓度,经计算处理后,给出控制信号,控制风机运转,供给必要的新鲜风量,稀释烟雾浓度和CO浓度,以达到设计要求的公路隧道环境卫生

与安全标准, 如图 1 所示。



图 1 公路隧道通风反馈控制

在该控制方法下, 主要设备包括控制中心计算机系统、区域控制器、CO-VI 检测器、风机控制柜及射流风机等。根据需要的通风控制参数:

(1) 当由 CO 浓度控制时

$$\Delta \delta_{co} = |\delta_s - \delta| \quad (1-1)$$

CO 浓度控制阈上限  $\Delta \delta_{co}^+ \leq \Delta \delta_{co}$

CO 浓度控制阈下限  $\Delta \delta_{co}^- \leq \Delta \delta_{co}$

式中:  $\delta$ ——表 2.2-1 规定的 CO 设计浓度值;

$\delta_s$ ——全隧道各通风分段的 CO 检测仪测得的浓度值实时最大值;

$\Delta \delta_{co}$ ——CO 浓度控制阈值。

(2) 当由烟雾浓度控制时

$$\Delta K_s = |K_s - K| \quad (1-2)$$

烟雾浓度控制阈上限  $\Delta K_s^+ \leq \Delta K$

烟雾浓度控制阈下限  $\Delta K_s^- \leq \Delta K$

式中:  $K$ ——表 2.2-2 和 2.2-3 规定的烟雾设计浓度值;

$K_s$ ——全隧道各通风分段的 VI 检测仪测得的浓度值实时最大值;

$\Delta K$ ——烟雾浓度控制阈值。

(3) 当由风速 (排烟) 控制时

$$\Delta V = |V_s - V| \quad (1-3)$$

排烟风速控制阈上限  $\Delta V_s^+ \leq \Delta V$

排烟风速控制阈下限  $\Delta V_s^- \leq \Delta V$

式中:  $V$ ——火灾时排烟风速可按 2~3m/s 取值;

$V_s$ ——全隧道各通风分段的风速风向检测仪测得的隧道内风速实时值;

$\Delta V$ ——排烟风速控制阈值。

## 二、基于变频调速的按需通风技术

经过国内外众多专家学者的深入研究, 公路隧道通风控制方式技术已经得到长足的发展, 通过“前馈”、“前馈+反馈”以及“风机动叶可调”等技术一定程度上实现了公路隧道机械通风按需控制, 但各种通风控制的方式最终都基于传统风机台数有级控制的方法对公路隧道内风速和风量进行调节, 即通过对射流风机的开启台数来控制公路隧道内风速。利用变频技术调控每一台射流风机的风量来实现隧道内风速的无级控制, 将产生更好的运行效果。在此方式下, 隧道内风速将最接近设定的目标风速, 射流风机运行能耗更低。

图 1 为上述两种运转方法的电力消耗对比结果, 其中绿色阶梯状曲线所闭合的空间即使传统台数控制方法下的通风系统运营能耗, 而蓝色平滑实曲线闭合的空间则是变频控制方法

下的运营能耗, 其差值即阴影部分就是两种控制方法之间的能耗差, 即节能的效益, 可见目前国内通常使用的有级调节风量方法有较大的节能潜力可以挖掘。

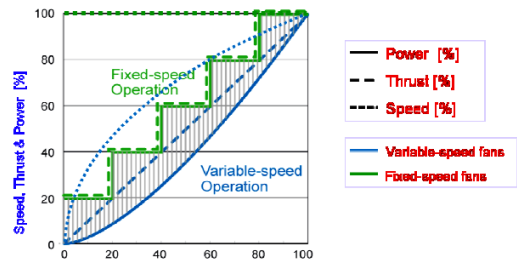


图 2 电力消耗对比图

而另一方面, 由流体力学及电机学原理可知, 风机工况参数与电源频率关系为:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{f_1}{f_2}, \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2, \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^3$$

式中:  $Q$ ——风机风量;

$H$ ——风机风压;

$P$ ——风机功率;

$f$ ——电源频率 (r/min)。

由此可见, 风量与电源频率成正比, 风压与电源频率的平方成正比, 功率与电源频率的立方成正比。因此, 通过变频方式改变风量时, 当风量下降 20%时, 功率可将下降 49%; 如风量下降 50%, 功率可下降 87.5%。而事实上, 公路隧道通风的设计时往往考虑一定冗余, 另外隧道通车运营时, 绝大部分时间也未达到最大设计交通量, 也即是说, 在运营时并不需要同时开启所有风机。从风机工况参数与电源频率关系可知, 通过变频技术实现隧道风量下调, 并传统台数控制有更大的节能空间。

## 三、公路隧道变频通风控制的特性

公路隧道内风量的控制主要依靠射流风机启动台数的不同来实现, 在传统的台数控制下, 风机运转方式很简单, 全速运转或者完全停止。可以运转 1 台、2 台或者 10 台、12 台射流风机, 但不能运转 2.5 台或者 11.25 台风机射流风机。

但在实际运营过程中, 大多数情况下隧道内的所需风量都不会是风机台数的整数倍, 当实际需要 2.5 台风机全速开启的风量时, 传统台数控制就只能运行 3 台风机才能满足要求, 那么在此情况下, 多余的推力就相应被浪费。

射流风机推力  $F$  计算公式如下:

$$F \approx \eta \rho A V_j (V_j - V_{air}) \quad (3-1)$$

式中:  $F$ ——风机推力;

$\eta$ ——风机效率;

$\rho$ ——空气密度;

$A$ ——风机断面面积;

$V_j$ ——风机出口风速;

$V_{air}$ ——隧道内的平均风速。

射流风机需要的电力  $W$  为:

$$W \approx FV_j / \eta_{elec} \quad (3-2)$$

式中:  $\eta_{elec}$ ——风机电气效率。

通过流体力学及电机学原理,可以得出风机工况参数与电源频率关系:风量与电源频率成正比,风压与电源频率的平方成正比,电机轴功率与电源频率的立方成正比。由此可知,公路隧道运营通风电能消耗与风量为立方的关系。因此,如果低速运转3台射流风机,实现2.5台风机的风量,则每台射流风机的推力是全速运转的83%,风机出口风速约为全速运转状况下的91%,3台射流风机的耗电量大约只有全速运转时的76%。

图3为上述两种运转方法的电力消耗对比结果,其中绿色阶梯状曲线所闭合的空间即使传统台数控制方法下的通风系统运营能耗,而蓝色平滑实曲线闭合的空间则是变频控制方法下的运营能耗,其差值即阴影部分就是两种控制方法之间的能耗差,即节能的效益,可见目前国内通常使用的有级调节风量方法有较大的节能潜力可以挖掘。

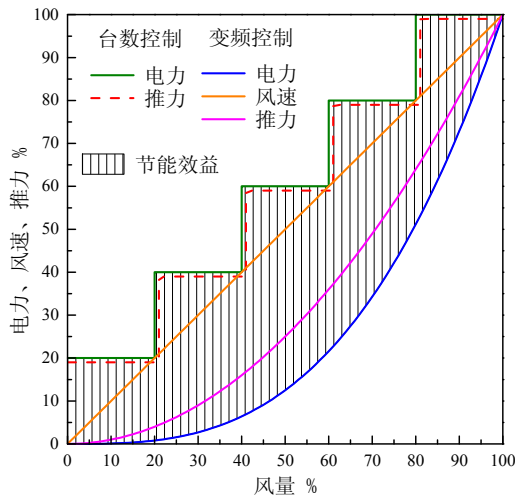


图3 电力消耗对比图

由流体力学及电机学原理可知,风量  $Q$  与转速的一次方成正比,风压  $H$  与转速的平方成正比,电机轴功率  $N$  与转速的立方成正比,即风量  $Q$  与电源频率成正比,风压  $H$  与电源频率的平方成正比,电机轴功率与电源频率的立方成正比。当风量减少,风机转速下降时其电机轴功率下降很多,因此,通过变频调速方式改变风量时,当风量下降20%时,电机轴功率可将下降49% $[(1-0.8^3)]$ ;如风量下降50%,电机轴功率可下降87.5% $[(1-0.5^3)]$ 。

图4是一台风机的风量  $Q$ 、风压  $H$  以及电机转速  $n$  与电机功率  $N$  的关系曲线图,可说明其节能原理:图中曲线1为风机在恒速下的风压-风量 ( $H-Q$ ) 特性。曲线2为恒速下功率-风量 ( $N-Q$ ) 特性。曲线3为阻力特性。假设风机工作在A点效率最高,输出风量  $Q$  为100%,此时轴功率  $N_1$  与  $Q_1$ 、 $H_1$  的乘积面积  $AH_1OQ_1$  成正比。当风量需要从  $Q_1$  减少到  $Q_2$  (例如50%风量)时,阻力特性变成曲线4,系统由原来工况点A变成新的工况点B运行,由图中可以看出,风压反而增加,轴功率  $N_2$  与面积  $BH_2OQ_2$  成正比,减少不多。如果采用调速控制方式,风机转速

由  $n_1$  降到  $n_2$ ,根据风机参数的比例定律,画出在转速  $n_2$  下的风压-风量 ( $H-Q$ ) 特性,如曲线5所示。可见在满足同样风量  $Q_2$  的情况下,风压  $H_3$  大幅度降低,功率  $N_3$  (相当于面积  $CH_3OQ_2$ ) 随之显著减少,节省功率损耗  $\Delta N = \Delta HQ_2$ ,与面积  $BH_2H_3C$  成正比。

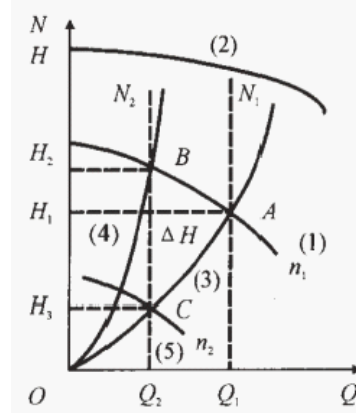


图4 风量-风压-转速-功率关系曲线图

因此,采用变频调速方式来调节风量的方法使电机轴功率大大降低,节能效果显著。同时在通风控制系统中,直接启动和停止射流风机运行会影响电网以及其它用电设备的正常工作,而通过设定电机的变频启动可以避免以上弊端,可控制电机启动电流在额定电流的1.5倍以内。所谓电机的变频启动,就是将电机外施电压自动平滑上升,同时电机的输出力矩随电压的增加而增加,使电动机从停止状态向满载运行状态逐步加速,采用变频启动技术可以避免全电压直接启动时对电网的冲击。

公路隧道变频通风控制模式为:CO-VI 检测器将当前的公路隧道内 CO、VI 浓度值输入到控制器中,然后控制器发出信号给变频器,变频器则根据信号要求改变输出电源频率,进而改变风机电机转速,从而达到调节风量的目的。公路隧道内风速的变化,引起公路隧道内污染物浓度的变化。到下一控制周期时,控制器根据当前实时 CO、VI 浓度值来确定本控制周期的变频器输出电源频率,重复上述工作流程,即可得到各个控制周期的变频器输出电源频率值,从而使得通风系统始终运行在节能状态。如图5所示。

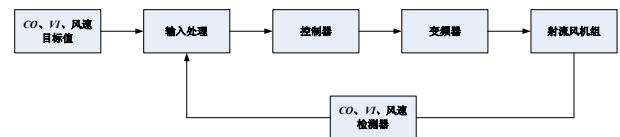


图5 公路隧道变频通风控制模式(反馈控制)

#### 四、公路隧道变频通风控制模式

通过 CO-VI 检测器将当前的公路隧道内 CO、VI 浓度值输入到控制器中,然后控制器发出信号给变频器,变频器则根据信号要求改变输出电源频率,进而改变风机电机转速,从而达到调节风量的目的。公路隧道内风速的变化,引起公路隧道内污染物浓度的变化。到下一控制周期时,控制器根据当前实时 CO、VI 浓度值来确定本控制周期的变频器输出电源频率,重复上述工作流程,即可得到各个控制周期的变频器输出电源频率

值, 从而使得通风系统始终运行在节能状态。

根据交通量变化、洞外自然风速风向、计算行车速度等变化情况, 提出营运通风智能按需控制要求, 实现公路隧道内风速的无级调控, 达到运营通风节能的目的。

**结论:**

综上所述, 在我国社会经济高速发展的背景下, 公路隧道工程数量不断增多, 公路隧道远程变频通风控制系统是针对减少隧道通风能耗和在火灾情况下控制洞内风速而开展研究, 以实现隧道通风系统风量智能无级控制, 降低隧道运营通风电能消耗, 延长通风设备使用寿命, 提升隧道通风防灾减灾水平, 改进公路隧道运营管理技术手段。

**[参考文献]**

[1]万建国,彭劲松.公路隧道营运通风节能优化设计探讨[J].现代隧道技术,2019,56(S2):471-477.DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2019.S2.068.

[2]邢荣军,徐湃,蒋树屏,陈豪.交通隧道远程变频通风技术研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(04):18-23.

[3]张星阳.PLC下的高速公路隧道通风节能系统探究[J].科技风,2017(15):261.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.201715230.

[4]俞文生,长大公路隧道综合节能技术应用研究与示范.江西省,江西省高速公路投资集团有限责任公司,2017-12-29.

[5]王鑫森,张淑梅.高速公路隧道通风系统节能设计分析[J].交通世界,2019(11):127-129.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2019.11.054.

[6]薛超.基于变频调速的隧道通风控制系统研究[D].长安大学,2014.

[7]张帆.高速公路隧道风机变频器应用节能与经济分析[J].河南科技,2016(05):130-131.

[8]李月全.基于模糊PID控制的隧道通风节能系统的研究[D].中北大学,2021.DOI:10.27470/d.cnki.ghbgc.2021.000078.

[9]郑方.公路隧道通风优化设计与控制[J].四川建材,2022,48(07):110-111.

[10]严涛.高海拔单洞双向特长公路隧道通风关键技术研究[D].西南交通大学,2016.

**通讯作者简介:**

黄文摄,出生年月:1986.10.06,汉族,男,广东湛江,主管,交通工程工程师,大学本科(在读研究生须注明博士研究生或硕士研究生)研究方向:高速公路交通工程。