

风力机与地下工程用通风机 匹配分析*

中铁二院工程集团有限责任公司 王子云[☆] 钟星灿 喻 渝
西南交通大学 雷 波

摘要 通过对风力机和地下工程用通风机特性分析,讨论了利用风力机作为动力源驱动通风机对地下工程进行通风的匹配方法。通过实例计算对所讨论方法进行了验证,结果表明在达到两者匹配的设计风速时,可以完全满足地下工程通风要求。在风能资源丰富的地区,利用风力机部分替代电能驱动地下工程通风机,可实现地下通风的风能有效利用,促进地下工程通风的节能减排设计。

关键词 风力机 通风机 地下工程 匹配

Matching of a wind turbine with a fan in underground spaces

By Wang Ziyun[★], Zhong Xingcan, Yu Yu and Lei Bo

Abstract Analyses characteristics of the wind turbine and ventilation fan for underground engineering, and discusses the matching scheme with a wind turbine as power supply. Verifies the scheme with calculation examples. The results show that the energy magnitude of the wind turbine can meet the demand of underground engineering ventilating when the matching wind speed reaches the design value. In the areas with wind abundant energy resources, this method can realize the effective wind energy utilization and promote the energy saving design of underground engineering ventilation.

Keywords wind turbine, ventilation fan, underground engineering, matching

① ★ China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, China

0 引言

目前风能在建筑中的应用主要是加强自然通风,对于高出地面的建筑,风能对建筑自然通风的贡献是很容易实现的,利用风能加强地面建筑自然通风的技术也已经相当成熟^[1-3]。而隧道、矿井等地下工程,一则其与大气接触的通道面积小,二则自然风的风向常年变化,很难利用自然风长时间满足其通风换气要求,通常都是通过电力带动斜、竖井通风机或者其他形式电动机械通风来达到其环控要求的。目前功率为 300~1 000 kW 的风力机已经普遍投入商业化生产,而隧道和矿井用通风机功率通常为 90~600 kW,可见利用风力机驱动通

风机可完全满足地下工程通风要求。在国家大力提倡节能减排的形势下,利用可再生的风能驱动风力机为地下工程通风机直接提供动力,是地下建筑节能的一大创新^[4]。而风力机和地下工程用通风机的结合需要功率和转速上的匹配,本文对其匹配进行分析。

1 通风机特性

通风机的特性通常用全压 p (或静压) 随风量 Q 变化的曲线来表述,其输入轴功率 N_i 可表述

①☆ 王子云,男,1972 年 11 月生,博士,博士后
610031 四川省成都市通锦路 3 号中铁二院技术中心
(0) 13981820692
E-mail: wzyfirst@163.com
收稿日期:2009-09-02
修回日期:2009-12-28

* 中铁二院科技攻关项目(编号:09175011)

为^[5]

$$N_t = \frac{pQ}{\eta} \quad (1)$$

式中 η 为效率, 通常包括机械传动、摩擦等引起的外部损失以及内部的流动、容积损失。

通风机在不同转速下运行时, 符合如下相似律^[6]:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}, \frac{p_1}{p_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (2)$$

将不同转速下的通风机特性曲线和管网特性曲线绘制到同一图中, 可以得到各转速下通风机的运行工况点, 见图 1。

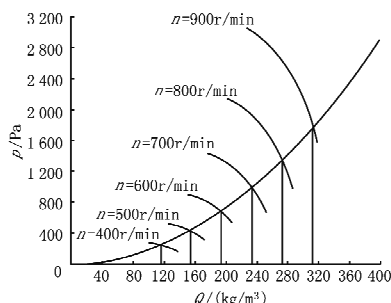


图 1 通风机 p - Q 特性及管网特性曲线

利用 $N_i = \frac{pQ}{\eta_i}$ (其中 η_i 为通风机内部效率, 由相似律可知, 转速变化时其值基本不变, N_i 为内部功率)。可将通风机与管网匹配的功率随转速的变化绘制成图 2, 这一曲线可作为与风力机结合时的载荷曲线。

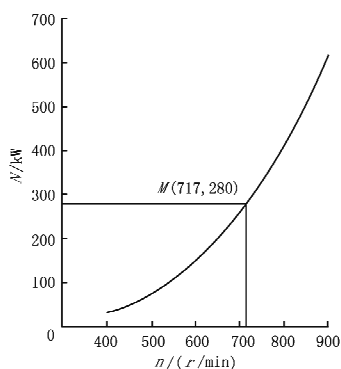


图 2 通风机 N - n 特性曲线

2 风力机特性

风力机功率特性可表示为^[7]

$$N_w = \frac{C_N \rho U_\infty^3 \pi r^2}{2} \quad (3)$$

式中 N_w 为输出功率, W; C_N 为功率系数; ρ 为空气

密度, kg/m^3 ; U_∞ 为来流风速, m/s ; r 为风轮的旋转半径, m 。

由式(3)可见, 风力机的输出功率由风力机尺寸参数、来流风速以及功率系数决定。功率系数 C_N 是风力机设计中最重要特性参数, 其值是尖速比 $\lambda = \frac{\omega r}{U_\infty} = \frac{2\pi n r}{60 U_\infty}$ (其中 ω 为风力机叶轮角速度, r/s) 和叶片桨距角 β 的函数, 风力机特性描述通常是给出功率系数随尖速比的变化曲线, 如图 3 所示。可根据图中曲线, 结合风力机尺寸参数, 取不同来流风速和转速, 绘制风力机输出功率 N_w 在不同风速下随转速的变化曲线, 见图 4, 随着来流风速的增加, 输出功率的最大值增加。

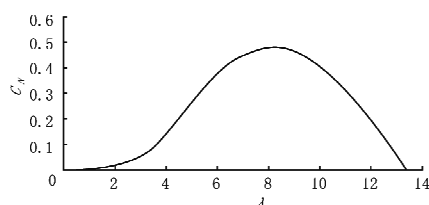


图 3 风力机 C_N - λ 特性曲线

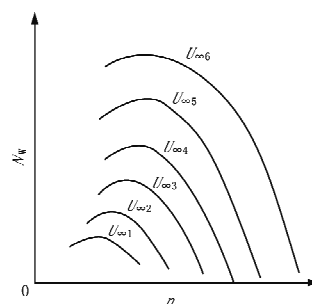


图 4 风力机 N_w - n 特性曲线

3 通风机和风力机的匹配方法

由于风力机转速通常为几十 r/min , 而通风机转速一般为 1000 r/min 左右, 如果直接将风力机和通风机连接, 难以使通风机在合理需求的工况范围内运行, 需要齿轮箱增速, 使通风机有合理的转速, 其匹配可以按如下步骤实现。

1) 根据地下工程所需通风量、管网阻力特性以及所选通风机特性, 得到如图 2 所示的功率随转速变化的曲线, 并确定额定工况点 M 。

2) 将额定工况点 M 的功耗乘以 $1/\eta_m$ (η_m 为通风机外部效率, 在此主要用于预估机械传动以及摩擦损失), 得到通风机的轴功率。

3) 根据通风机的轴功率选择合适功率的风力

机(由于风力机功率随着来流风速增加,在此不考虑容量储备系数),并绘制风力机功率-转速特性曲线。

4) 确定齿轮箱的转速比,将通风机功率-转速特性曲线横坐标乘以 $1/k$,纵坐标乘以 $1/\eta_m$,绘制到上一步得到的风力机功率-转速特性曲线上,即得到风力机工作特性曲线 L_2 ,并同时确定风力机额定工况点 M' ,见图 5。

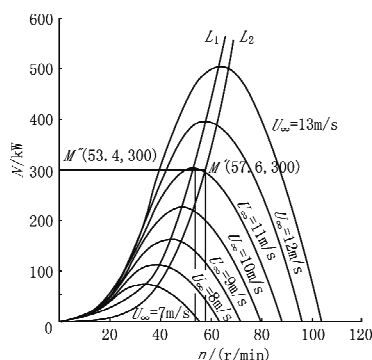


图 5 通风机和风力机匹配 $N-n$ 特性曲线

此时,图 5 中 M' 点对应的转速即为通风机额定工况下的风力机转速, M' 对应的来流风速即为控制额定功率输出的风速限值。当来流风速小于此风速时,随着风速的增加,通风机处于变速运行;当来流风速大于此风速时,控制风力机输出为额定功率(这里不考虑容量储备系数,如果要考虑一定的容量系数,可调高控制风速限值)。而曲线 L_2 越靠近最大功率曲线 L_1 ,则风力机处于更佳的工作状态,效率更高。

4 实例设计

某公路隧道运营采用竖井通风,其中一排风井排风量经计算为 $240 \text{ m}^3/\text{s}$,压力损失为 $1\,050 \text{ Pa}$ 。采用某国产隧道专用轴流风机,考虑内部效率为 0.90 ,则通风机内部功率为 280 kW 。考虑风力机与通风机齿轮箱连接,机械传动效率为 0.95 ,则通风机轴功率为 294.7 kW 。根据这一功率,需要选择输出功率为 300 kW 的风力机,方案设计如下。

4.1 轴流风机特性

图 1 为所选轴流通风机 $p-Q$ 特性及管网特性曲线,用图中管网特性曲线和各转速下轴流风机性能曲线的交点所得压力、流量以及内部效率(0.90),计算得到的内部功率,将其随转速的变化

绘制到图 2 中。图中同时给出输出内部功率为 280 kW 时的转速为 717 r/min 。

4.2 风力机特性^[8]

$$C_N = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (4)$$

其中 $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$,由式(4)可得到风力机功率系数特性曲线,见图 3。取风力机叶轮半径为 16 m ,空气密度为 1.225 kg/m^3 ,并结合式(3),得到风力机不同风速下的功率随转速的变化,见图 5,图中 L_1 为最佳功率曲线。

4.3 风力机和通风机匹配

由风力机所需提供给轴流通风机的轴功率 300 kW ,可在图 5 曲线 L_1 上得到点 M' ,这时风力机转速为 53.4 r/min ,与图 2 中的点 M 所对应的通风机转速 717 r/min 比较,可得转速比为 13.43 ,为使风力机在与通风机匹配过程中保持稳定的工况,其载荷曲线需要在最佳功率曲线的右侧,为此取转速比为 12.5 。用这一转速比,将图 2 中的曲线横坐标除以 12.5 ,纵坐标除以 0.95 ,并绘制到图 5 中,得到曲线 L_2 ,此曲线和不同风速下风力机功率特性曲线的交点,即为不同风速下风力机和通风机匹配时通风机的工况点。

由于当来流风速达到一定值后,风力机自然输出功率将超过通风机所需额定轴功率(300 kW),此时需要通过变桨距等方式控制风力机,使其工作在额定功率下,根据图 5 中不同风速下的风力机功率曲线和曲线 L_2 的交点绘制通风机轴功率随来流风速的变化得到图 6,图中当轴功率大于 300 kW 时,通过风力机控制,使得通风机在额定工况下持续工作。此时来流风速控制限值为 11.03 m/s 。

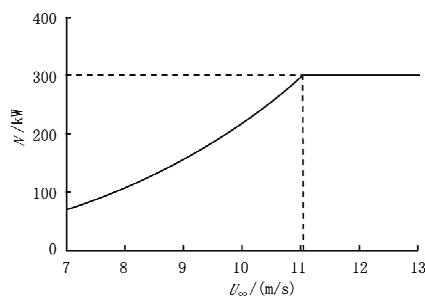


图 6 通风机轴功率随来流风速的变化

(下转第 26 页)